Série E.

N° d'ordre : 34

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. Charles BOIS

ASSISTANT A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE STRASBOURG

1re THÈSE. — Recherches sur les séismographes destinés a l'inscription de la composante verticale du mouvement du sol.

2e THÈSE. — Sur les phases des séismes très éloignés (10.000 km. et au dela).

Soutenues le 17 juin 1933 devant la Commission d'examen.

MM. E. ROTHÉ, *Président.*
R. THIRY,
G. REMPP,
J. LACOSTE, } *Examinateurs.*

TOULOUSE
ÉDOUARD PRIVAT, Libraire-Éditeur.
Librairie de l'Université.
14, RUE DES ARTS

1933

Série E.

N° d'ordre : 34

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. Charles BOIS

ASSISTANT A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE STRASBOURG

1re THÈSE. — Recherches sur les séismographes destinés a l'inscription de la composante verticale du mouvement du sol.

2e THÈSE. — Sur les phases des séismes très éloignés (10.000 km. et au dela).

Soutenues le juin 1933 devant la Commission d'examen.

MM. E. ROTHÉ, *Président.*
R. THIRY,
G. REMPP, } *Examinateurs.*
J. LACOSTE,

TOULOUSE

ÉDOUARD PRIVAT, Libraire-Éditeur.

Librairie de l'Université.

14, RUE DES ARTS

1933

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

MM.

Doyen	E. Rothé, professeur de Physique du Globe.	
Doyens honoraires	E. Bataillon, P.-Th. Muller.	
Professeurs honoraires.	Esclangon, Fréchet, G. Friedel, Gignoux, H. Villat.	
Professeurs	G. Valiron	Analyse supérieure.
	P. Weiss	Physique générale.
	H. Ollivier	Physique générale.
	H. Gault	Chimie organique.
	C. Houard	Botanique.
	E. Terroine	Physiologie générale.
	J. de Lapparent.	Minéralogie et Pétrographie.
	R. Thiry	Mécanique rationnelle.
	G. Cerf	Calcul différentiel et intégral.
	G. Dubois	Géologie et Paléontologie.
	N	Physique expérimentale.
	P. Flamant	Mathématiques générales.
	E. Cornec	Chimie générale.
	A. Danjon	Astronomie.
	P. de Beauchamp.	Biologie générale.
	N	Chimie minérale.
	N	Zoologie et anatomie comparée.
	L. Bounoure	Zoologie.
	G. Foex	Physique générale.
	H. Chermezon	Botanique.
	G. Rempp	Physique du Globe.
	R. Romann	Chimie physique et électrochimie.
	J. Lacoste	Physique du Globe.
	H. Milloux	Mathématiques.
Maîtres de Conférences.	Ch. Staehling	Chimie appliquée.
	G. Hugel	Chimie du Pétrole.
	H. Weiss	Physico-Chimie du Pétrole.
	P. Soleillet	Physique mathématique.
	R. Bonnet	Physique et Chimie biologiques.
	J. Jung	Géologie du Pétrole.
	A. Roussel	Mathématiques générales.
	A. Chrétien	Chimie appliquée.
	J. Maresquelle	Botanique.
	H. Cartan	Mathématiques.
	N	Minéralogie.
Secrétaire	G. Cuvier.	

R. UNIV
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

A Monsieur E. ROTHÉ

DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES
DIRECTEUR DE L'INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE
DIRECTEUR DU BUREAU CENTRAL INTERNATIONAL DE SÉISMOLOGIE

Hommage reconnaissant.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552728_0012

RECHERCHES SUR LES SÉISMOGRAPHES

DESTINÉS A

L'INSCRIPTION DE LA COMPOSANTE VERTICALE

DU MOUVEMENT DU SOL

INTRODUCTION

Pour étudier complètement les tremblements de terre, il faut inscrire non seulement les composantes horizontales mais aussi la composante verticale du mouvement du sol. Apparue dès le début de la séismologie instrumentale, cette nécessité s'est imposée avec une force croissante, à mesure que les appareils se perfectionnaient et que des progrès étaient réalisés dans l'analyse des séismogrammes. En effet, on sait que les appareils verticaux permettent la mesure de l'azimut et de l'angle d'émergence; parfois ils enregistrent des phases qui échappent aux appareils horizontaux. Enfin leurs inscriptions servent à déterminer si la première onde d'un séisme est une onde de compression ou de dilatation : de telles observations faites sur un réseau de stations dans la région épicentrale permettent de savoir quels ont été les déplacements relatifs de la marqueterie terrestre. Il est donc essentiel qu'un observatoire séismologique soit muni de bons séismographes verticaux.

Malgré toutes ces raisons, aujourd'hui encore, bon nombre de stations ou n'en possèdent pas, ou n'en possèdent que d'in-

suffisants. Cela tient sans doute au fait que de tels séismographes sont d'un usage plus compliqué et d'un maniement plus délicat que les horizontaux, et que la théorie en est moins certaine. D'autre part pour équilibrer l'action de la pesanteur, il faut soutenir la masse par un ressort, dont la présence entraîne des difficultés de divers ordres.

1° *Période.* — Un système oscillant dans de telles conditions possède une période très courte, et l'on sait que pour l'étude des tremblements de terre, il convient de donner à l'appareil une période assez voisine de celle des ondes que l'on se propose d'enregistrer. On utilise pour cela des dispositifs dits d'astatisation. Ce terme, consacré par un long usage (on le trouve déjà sous la plume de Gray en 1881), est impropre. Il semble, en effet, indiquer que l'on cherche à amener l'appareil à l'état d'équilibre indifférent; or, par définition, tout séismographe doit être à l'état d'équilibre stable. Autrement dit, après avoir subi un léger choc, il doit reprendre sa position initiale, faute de quoi l'on n'aurait plus affaire à un séismographe, mais à un séismoscope. Un tel appareil n'inscrirait que le début des phénomènes, et serait impropre à un enregistrement continu. J'abandonnerai donc le terme d'astatisation, et il ne sera question que de l'obtention de périodes suffisamment élevées.

2° *Sensibilité à la température.* — Le second ordre de difficultés est dû au fait que le coefficient d'élasticité des ressorts varie avec la température. Par suite, la position d'équilibre de l'appareil est fonction de cette dernière. Les déplacements du zéro peuvent être tels que les inscriptions deviennent complètement illisibles; il peut même arriver que le levier vienne se caler contre le bâti. D'où la nécessité de protéger les appareils verticaux contre les variations de température; les ressorts peuvent être enfermés dans des caisses métalliques; les appareils eux-mêmes peuvent être placés dans des cages en verre, parfois doublées de feutre. Toutes ces précautions se montrent insuffisantes : il est donc de toute nécessité, par une construction

appropriée, de compenser l'effet de la température. Un tel dispositif est dit de compensation.

Les descriptions des différents types de séismographes verticaux se trouvant dispersées dans de nombreuses publications, je rappellerai d'abord, dans un premier chapitre, les caractéristiques des appareils construits de 1841 à 1915. Un deuxième chapitre sera consacré aux séismographes modernes. L'évolution de la séismologie instrumentale a fait surgir un certain nombre de problèmes : j'examinerai les solutions proposées par les divers auteurs et j'en ferai la critique. Je montrerai la nécessité d'utiliser des appareils à lourde masse pour l'étude des séismes rapprochés ; je donnerai des indications sur l'installation de la composante verticale du grand pendule de Strasbourg, dont M. Rothé a bien voulu me charger, et sur les recherches, commencées depuis plusieurs années, que j'ai faites à cette occasion.

Le troisième chapitre traitera des dispositifs d'augmentation de période ; j'y exposerai les mesures que j'ai effectuées sur le vertical Wiechert de 1200 kgs., ainsi que sur le grand pendule de Strasbourg. Je décrirai la construction que j'ai établie sur ce dernier, et j'indiquerai les conclusions auxquelles j'ai été conduit.

Enfin, dans un quatrième chapitre, j'étudierai la sensibilité des différents types d'appareils aux variations de la température. Je passerai en revue les diverses méthodes de compensation ; je terminerai en décrivant le dispositif nouveau que j'ai construit pour le grand pendule de Strasbourg, et en indiquant les résultats obtenus.

Qu'il me soit permis d'adresser ici mes remerciements les plus vifs à M. le doyen E. Rothé, directeur de l'Institut de Physique du globe de Strasbourg, qui m'a guidé dans mes recherches, et m'a encouragé de ses conseils bienveillants.

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE (1841-1915)

Les séismographes verticaux sont aussi anciens que les horizontaux. D'après Wiechert[1], c'est à l'Écossais Comrie (1841) qu'il faut attribuer l'invention des uns et des autres. Les instruments construits jusqu'alors étaient des séismoscopes, indiquant seulement le début des phénomènes. Comrie fut le premier à inscrire d'une façon continue le mouvement du sol, soit sur du sable, soit sur une feuille de papier. Son premier appareil vertical était très simple. Il consistait en une masse suspendue directement à un ressort à boudin. Dans ces conditions, la période obtenue était très courte et la sensibilité tout à fait insuffisante. L'auteur parvint à augmenter la période en ne suspendant plus la masse directement au ressort, mais en utilisant un levier intermédiaire.

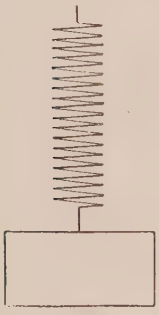


Fig. 1.

Au Japon, Ewing et Gray[2] (1881) inventèrent chacun de leur côté un système de suspension permettant d'accroître la période. Leurs appareils peuvent se ramener au type suivant : la masse M (600 gr.) est fixée à l'extrémité du bras de levier AC oscillant autour de l'axe A. Le système est maintenu en équilibre par le ressort à boudin OH s'attachant directement au bras. Un jeu de leviers permet l'inscription des oscillations sur une feuille enduite de noir de fumée. Pour accroître la période, il suffit : 1° d'augmenter la masse M; 2° d'augmenter la dis-

1. **42**, p. 156.
2. **12**, p. 140 et **15**, p. 137.

tance AC du centre de gravité de la masse à l'axe de rotation; 3° de diminuer la distance AH du ressort à boudin à l'axe de rotation. Théoriquement on devrait pouvoir obtenir telle période que l'on désire : en fait, au-dessus d'une limite assez vite atteinte, l'appareil devient instable. Il est de plus très sensible aux variations de température. Les auteurs n'ont pas indiqué dans leurs mémoires quelles étaient les constantes obtenues, mais des dessins et des quelques indications qu'ils donnent, il est facile de conclure que période et sensibilité étaient encore insuffisantes.

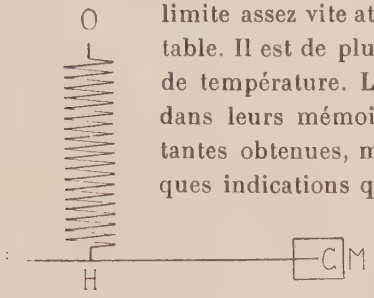


Fig. 2.

En 1898, en Italie, Vicentini[1] créa un nouveau type : le bras de levier AC est constitué par un demi-ressort de voiture maintenant la masse M en permettant les oscillations autour de l'axe A. L'inscription se faisait encore sur noir de fumée; la masse était de 50 kgs, la période de 1[s] et l'agrandissement 100. Cet appareil n'est pas très sensible; il est peu propre à l'étude des tremblements de terre très éloignés. Il peut par contre donner quelques résultats dans le cas de séismes rapprochés. C'est à ce titre qu'il a été conservé dans un certain nombre de stations italiennes, où il est encore actuellement en service.

Fig. 3.

Le *gravimètre-trifilaire* de A. Schmidt[2] (1899) étant, non un séismographe, mais un accéléromètre, je le laisserai de côté. Il fut installé dans un grand nombre d'observatoires, notamment en Allemagne, mais on dut l'abandonner, à cause de sa sensibilité excessive aux variations de la température.

1. **40**, p. 33.
2. **34**, p. 109.

Schlüter[1] (1900) avait cherché à étudier les variations de la verticale à l'aide d'une sorte de fléau de balance muni à chaque extrémité de masses en forme de lentilles. Les résultats obtenus avec cet appareil, dit *clinographe*, avaient été assez médiocres. L'auteur eut alors l'idée de le transformer en séismographe. L'adjonction d'un ressort à boudin R et d'une masse additionnelle M permit l'inscription de la composante verticale. L'enregistrement était optique; il y avait en outre un amortisseur à air. Le poids total des masses était de 14 kgs.

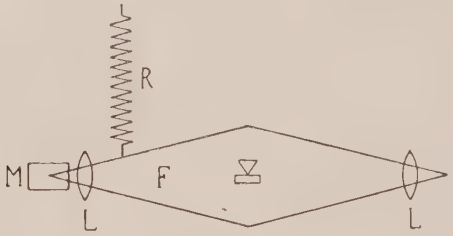


Fig. 4.

On atteignit 16[s] de période, avec un agrandissement de 160. Pour parer aux effets fâcheux des variations de température, l'auteur créa une *compensation* basée sur un principe analogue à celui des pendules à grille. Il semble être le premier à avoir proposé cette solution.

Tamaru[2] (1903) paraît avoir eu le premier l'idée d'utiliser un ressort auxiliaire à tension réglable pour obtenir une élévation de la période. Il décrit un petit appareil à inscription mécanique, dont la masse est constituée par un cylindre de 6 kgs. oscillant autour d'un axe A suivant l'une de ses génératrices. A l'autre extrémité B du diamètre AB s'attache le ressort principal PB. Un second ressort QC s'accroche à l'extrémité d'un levier AC perpendiculaire à AB. La liaison BAC est rigide et invariable. En faisant varier la tension du ressort QC, on fait varier la période de l'appareil : plus on tend le ressort, plus la

1. **33**, p. 437.
2. **38**, p. 637 et **39**, p. 167.

période augmente. L'auteur ne dit pas à quels résultats il est parvenu : il indique seulement son intention de construire un appareil plus sensible, d'un agrandissement égal à 200. Il ne semble pas avoir donné suite à ce projet.

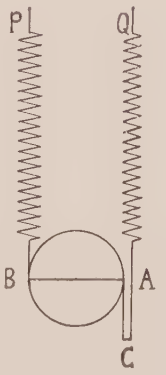


Fig. 5.

En 1904, Straubel[1] a établi pour l'Observatoire d'Iéna un grand appareil à inscription optique (*fig. 6* et *7*). La masse M est suspendue à un double ressort de voiture (205 cm. de long, 42 mm. de large, et 8 mm. d'épaisseur au milieu, la flexion initiale étant de 25 cm.). La transmission du mouvement se faisait au moyen de deux leviers coudés oscillant autour des axes O et entraînant deux miroirs plans *m*, à 45°; le rayon lumineux, après s'être réfléchi sur chacun d'eux une première fois, est ensuite renvoyé par un miroir concave, puis se réfléchit une deuxième fois sur les miroirs plans et va enfin impressionner une feuille de papier photographique sur un cylindre enregistreur E. Le chemin optique est donc très long : l'agrandissement va de 2000 à 4000. A l'extrémité supérieure de chacun des deux leviers coudés peut coulisser une petite masse *p*, dispositif permettant de porter la période à 6 ou à 8ˢ. On a installé un amortisseur à liquide. De plus, Straubel a adopté une compensation basée sur le même principe que les thermomètres métalliques bilames. Il ne semble pas que cet appareil ait été construit pour d'autres observatoires.

C'est vers 1905 que Wiechert a mis en service toute une série d'appareils. Celui de 80 kgs.[2] (*fig. 8*) avait le même système de suspension que celui d'Ewing, avec cette différence que le ressort à boudin s'attachait un peu au-dessous de l'axe AC, dispositif destiné encore à augmenter la période. L'inscription est mécanique, l'amortisseur à air, et il y a une compensation à grille. La période est de 8ˢ, l'agrandissement va de 40 à 160.

1. **37**, p. 594.
2. Sieberg, **35**, p. 449.

Cet appareil est assez répandu dans le monde entier, mais il n'a pas donné satisfaction et possède une assez mauvaise réputation.

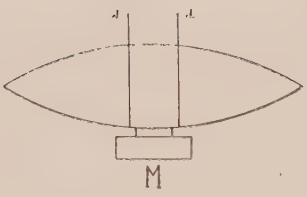


Fig. 6.

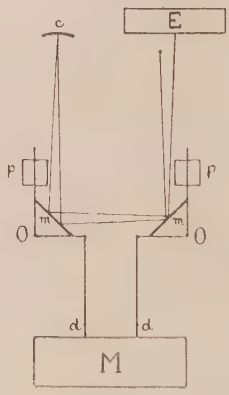


Fig. 7.

Le grand appareil de 1200 à 1300 kgs.[1] est bien supérieur. La masse est suspendue directement à 8 ressorts. L'agrandissement est d'environ 180. L'inscription est mécanique, l'amortissement à air. La compensation est du même type que pour le séismographe de 80 kgs. Pour augmenter la période, on utilise 2 ressorts auxiliaires agissant par l'intermédiaire de plusieurs le viers. Théoriquement, elle peut aller jusqu'à 6"; je reviendrai plus loin sur ce dispositif. Il est regrettable que cet appareil ne soit pas plus répandu dans les observatoires.

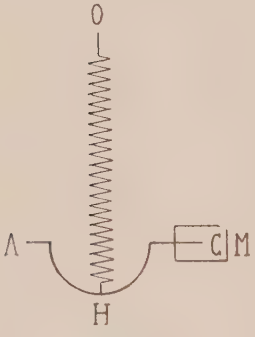


Fig. 8.

Wiechert[2] a de plus construit un petit appareil à inscription optique comportant une masse de 200 gr. formée par un disque de plomb maintenu par un ressort spiral accroché en un

1. Conrad, 8, p. 11 et Mintrop, 24, p. 365.
2. 42, p. 174.

point situé à une petite distance de son centre de gravité. L'agrandissement était de 2000, la période était très courte; cet appareil était destiné à l'étude des vibrations artificielles.

C'est aussi pour l'étude de ces dernières que Mintrop[1] (1909) a construit ses séismographes portatifs. La suspension est du type Ewing, l'amplification se fait par une combinaison de leviers mécaniques et d'un levier optique. L'agrandissement est du même ordre. Depuis, Wiechert, Mintrop et leurs collaborateurs ont perfectionné ces appareils. L'amplification a été portée jusqu'à 2 millions[2].

Vers la même époque, Grünmach[3] a construit ses vibrateurs. La masse est fixée à l'extrémité d'une lame vibrante portant des bobines qui se déplacent dans le champ d'un aimant. Lors des vibrations, il se produit des courants induits qui sont envoyés dans un galvanomètre dont ils font osciller l'équipage. Un faisceau lumineux, réfléchi par le miroir, vient impressionner un papier photographique. Grünmach est le premier à avoir utilisé la transmission galvanométrique. Il n'a pas indiqué les résultats obtenus : ils n'ont pas dû être satisfaisants ; la théorie montre en effet que ce mode de transmission est peu propre à l'inscription des ondes très courtes. Aussi MM. Maurain et Eblé[4], lorsqu'ils ont construit des vibrateurs pour l'inscription des explosions de La Courtine (1924), ont renoncé à la transmission galvanométrique, et ont combiné levier mécanique et levier optique. La période est de 0s,17, l'agrandissement de 450; l'amortisseur est à liquide.

Je reviens à l'étude des séismes naturels avec l'appareil de Galitzine[5] (1910) qui a modifié la suspension Ewing en fixant le point d'attache du ressort au-dessous du levier AC de telle sorte que son milieu soit situé précisément à la hauteur du levier, dispositif destiné à augmenter la période. Ici encore on utilise la transmission galvanométrique, mais les nouveautés

1. **14**, p. 208 et **26**, p. 76.
2. **20**, p. 134.
3. **16**, p. 853.
4. **23**, p. 337.
5. **13**, p. 1 et **14**, p. 225 et 380.

introduites par Galitzine consistent à donner au pendule et au galvanomètre sensiblement la même période. De plus, pendule et galvanomètre sont au voisinage de l'amortissement critique. Le poids du levier, masse et contrepoids compris, est de 24 kgs. La période atteint 12 à 13^s, et l'agrandissement dynamique peut atteindre et dépasser 1000. L'amortissement est magnétique, il s'obtient en plaçant sur le bras une lame de cuivre oscillant dans le champ d'un aimant. Le type construit par Galitzine ne comportait pas de compensation de température, ce qui entraînait de sérieux inconvénients auxquels on a tenté de remédier par divers procédés sur lesquels je reviendrai plus loin.

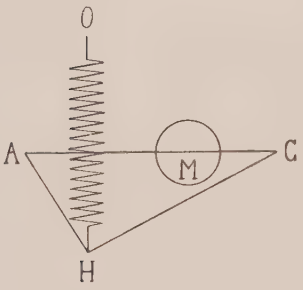


Fig. 9.

En 1915, Mainka[1] a décrit un appareil à inscription mécanique pouvant à volonté enregistrer soit la composante horizontale, soit la composante verticale (masse 400 kgs., période 10 à 15^s, agrandissement non indiqué). L'auteur ne semble pas avoir poursuivi ses recherches dans cette voie.

Le développement des études séismologiques a tout naturellement amené les auteurs à établir plusieurs types d'appareils spécialisés. Je ne reviendrai pas sur les instruments destinés à la mesure des vibrations artificielles; leur construction a pris depuis quelques années une grande extension en raison des besoins de la technique et de la prospection minière : leur étude a été activement poussée, et des ouvrages récents leur consacrent des chapitres très documentés[2]. Je laisserai également de côté les accéléromètres, séismophones, géophones et microphones, etc..., pour m'en tenir aux appareils fonctionnant d'une façon continue dans les observatoires.

1. **21**, p. 140.
2. Voir par exemple Angenheister (**1**).

Pour l'étude des séismes éloignés, une période longue est nécessaire : on s'adresse à l'appareil Galitzine et à ses dérivés. Pour l'inscription des séismes rapprochés, il faut au contraire une courte période : on emploie de préférence des appareils à lourde masse. Enfin, diverses recherches ont été faites pour adapter l'appareil Galitzine à l'enregistrement des secousses voisines. J'indiquerai, dans le prochain chapitre, les résultats obtenus dans ces différents ordres de travaux, en exposant d'abord ceux qui sont relatifs aux instruments à inscription optique, puis ceux qui se rapportent aux séismographes à inscription mécanique.

CHAPITRE II

RECHERCHES RÉCENTES; LA COMPOSANTE VERTICALE DU GRAND PENDULE DE STRASBOURG

A. Appareils à inscription optique.

D'une façon générale, les appareils à inscription mécanique se prêtent assez mal à l'enregistrement des séismes éloignés. Le plus sensible d'entre eux, le Wiechert de 1200 kgs., ne peut dans les cas les plus favorables dépasser une période de 6[s]. La première phase est généralement inscrite avec une netteté remarquable, mais les autres sont presque toujours mal enregistrées, et souvent même manquent. Le Galitzine au contraire, dont la période atteint 12 à 13[s], donne d'excellents résultats pour les séismes éloignés. La théorie ayant été largement développée dans l'ouvrage de l'auteur[1], je ne la répéterai pas ici.

1° *Travaux de Wilip et de Gütenberg relatifs à l'appareil Galitzine.*

Wilip[2] a fait un reproche au Galitzine[3], c'est de posséder une certaine dissymétrie dans les oscillations. Pour établir la symétrie, il ajoute un deuxième ressort EF dont le point d'attache

1. Voir **14**, pp. 380-390.
2. **45**, p. 387.
3. Dans les pages qui suivent, au lieu de dire : l'appareil vertical Galitzine, l'appareil Wiechert vertical de 1200 kgs, la composante verticale du grand pendule de 19 tonnes de Strasbourg, j'écrirai, pour abréger : le Galitzine, le Wiechert, et le grand pendule. Lorsqu'il sera question des composantes horizontales, je le spécifierai expressément.

est fixé en F au-dessus du deuxième levier. En théorie, il est parfaitement exact que le Galitzine, comme tous les séismographes verticaux, soit dissymétrique. Mais il n'apparaît pas que cette dissymétrie soit bien gênante. Sur des appareils bien réglés, elle est négligeable : on peut même dire qu'elle passe inaperçue. L'intérêt du problème posé par Wilip est donc plus théorique que pratique. Une comparaison méthodique des résultats obtenus au moyen de cet appareil avec ceux que fournit le Galitzine classique pourra seule permettre d'affirmer s'il est vraiment utile d'introduire ce deuxième ressort qui complique beaucoup la construction et les réglages.

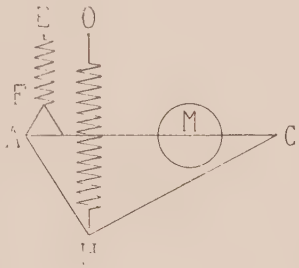


Fig. 10.

Un autre problème s'est posé : pourrait-on adapter le Galitzine à l'inscription des ondes à courte période? Si on arrivait à le résoudre par l'affirmative, on simplifierait notablement la construction des séismographes, puisqu'avec des modifications de détail on pourrait faire servir le même modèle à tous les usages. Au premier abord, cela semble impossible. Il y a en effet, et les traités classiques insistent sur ce point, une différence théorique essentielle entre les appareils Galitzine et les autres séismographes. Pour ces derniers, quand la période du mouvement du sol tend vers zéro, l'agrandissement tend vers une limite (agrandissement statique) plus ou moins grande, mais jamais nulle. Pour les Galitzine, au contraire, l'agrandissement tend vers zéro en même temps que la période. Cette particularité de la transmission galvanométrique semble la rendre impropre à l'inscription des courtes périodes. Il y a là une difficulté incontestable, mais on peut la surmonter dans une certaine mesure en plaçant les appareils Galitzine dans des conditions convenablement choisies.

Wilip (1928)[1] a porté à 2000 l'agrandissement dynamique

1. 44, p. 153.

maximum d'un Galitzine possédant une période propre de 12ˢ ; le calcul montre que pour une période de 1/2ˢ l'agrandissement est égal à 200, par suite du même ordre que dans les appareils courants à inscription mécanique. Gütenberg (1929)[1] a abaissé la période d'un Galitzine jusqu'à 3ˢ, l'agrandissement dynamique atteignant 4400 pour 2ˢ. Il a pu, de la sorte, inscrire parfaitement les ondes à courte période, aussi bien, affirme-t-il, qu'avec les grands appareils à inscription sur noir de fumée.

2° *Appareil Wenner.*

Wenner (1929)[2] a transformé profondément l'appareil de Galitzine au point d'en faire un instrument vraiment nouveau : 1° il a allégé la masse (500 gr. au lieu de 7 kgˢ.) ; 2° l'amortissement est produit par un shunt installé sur le circuit pendule-galvanomètre[3].

Ces deux modifications entraînent d'importants changements dans la théorie de l'appareil. On n'est plus en droit de négliger la réaction du galvanomètre sur le pendule ; de plus, la résistance du shunt et l'amortissement produit de son fait entrent en jeu.

Théorie résumée. — L'équation du mouvement θ du galvanomètre est :

$$k\theta'' + d\theta' + u\theta = gi \qquad (1)$$

pour une intensité i du courant induit produit par l'oscillation des bobines du séismographe dans le champ des aimants. k est le moment d'inertie, d le coefficient d'amortissement, u le coefficient de torsion, et g la constante électrodynamique du galvanomètre.

L'équation du mouvement Φ du séismographe lors d'un déplacement x du sol est :

$$K\Phi'' + D\Phi' + U\Phi = Gi - LMx''. \qquad (2)$$

1. **17**, p. 10 et **18**, p. 74.
2. **41**, p. 963.
3. Galitzine (**14**, p. 376) utilise un shunt pour l'étude des constantes du séismographe, mais ne conseille pas son usage d'une façon continue sur les appareils.

Les coefficients K, D, U, G, ont le même sens que précédemment, mais se rapportent au pendule au lieu de se rapporter au galvanomètre. L est la distance du centre de gravité de la masse M à l'axe de rotation.

L'auteur étudie les différentes branches du circuit et calcule les amortissements correspondants. En éliminant Φ et en différentiant deux fois, il aboutit à l'équation différentielle du 4e ordre :

$$\theta^{IV} + m\theta''' + n\theta'' + o\theta' + p\theta = qx'''. \qquad (3)$$

Les coefficients m, n, o, p, q, sont des constantes dont il donne la valeur en fonction des termes définis plus haut et des résistances ohmiques r du galvanomètre, R des bobines du pendule, et S du shunt.

Wenner indique une solution particulière de cette équation dans le cas d'un mouvement sinusoïdal du sol. Il obtient finalement une valeur compliquée de l'agrandissement, qui renferme au dénominateur des termes imaginaires.

L'équation (3) s'applique indifféremment aux appareils horizontaux et aux verticaux, tant qu'on ne précise pas la valeur de U, constante de rappel du séismographe. Si ω est la pulsation de l'appareil, on a $U = K\omega^2$. Pour tout appareil vertical à suspension Galitzine, on a :

$$U = \Lambda a^2 - Fh\left(1 - \frac{h}{Q}\right), \qquad (4)$$

Λ étant le coefficient d'élasticité du ressort, a la distance de son axe à l'axe de rotation, F sa tension à la position d'équilibre, et Q sa longueur correspondante, h étant la distance de son extrémité inférieure au bras. Il suffit de porter cette expression dans les équations de Wenner pour qu'elles s'appliquent à la composante verticale.

Constantes et résultats. — La période choisie est 12s,5, l'agrandissement maximum 1250; la courbe des agrandissements dynamiques a la même allure que celle du Galitzine. L'amortissement utilisé est très élevé (8 à 15 fois la valeur critique). L'auteur assure que, contrairement à l'opinion reçue jus-

qu'alors, de telles conditions n'entraînent pas une réduction notable de la sensibilité de l'appareil.

Comme pour l'appareil de Wilip, il sera nécessaire de comparer les résultats de l'appareil Wenner avec ceux que fournit le Galitzine classique : on sera alors en mesure de décider si vraiment il est opportun d'introduire de telles complications théoriques et si les transformations préconisées par l'auteur ont réellement leur raison d'être.

Reutlinger[1] (1929) a établi un appareil basé sur ce principe pour l'étude des vibrations artificielles. La période varie de 0s,11 à 0s,31.

3° *Appareil Benioff.*

Ce séismographe, construit par Benioff[2] (1932), utilise encore la transmission galvanométrique, mais ici les bobines B sont fixes et enroulées autour des pièces polaires de l'aimant, comme dans un récepteur téléphonique. Le pendule est constitué par une masse M suspendue directement à un ressort; elle porte une armature d'acier A astreinte à se déplacer parallélement à elle-même devant les pièces polaires de l'aimant. Les oscillations du pendule provoquent une variation de la réluctance des entrefers séparant l'armature de l'aimant : d'où variation de flux, et par suite, production d'un courant induit dans les bobines. Le circuit magnétique comprend en outre deux pièces supplémentaires *aa* constituant un shunt magnétique. On obtient l'amortissement critique à l'aide d'une plaque se déplaçant dans un liquide.

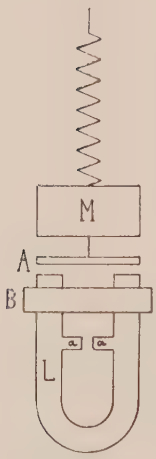


Fig. 11.

Théorie résumée. — Soit R_m la réluctance de l'aimant et des parties métalliques, R_s celle de l'entrefer du shunt, R celle des entrefers variables (entre l'armature et les pièces polaires)

1. 31, p. 230.
2. 3, p. 155.

exprimées en œrsteds, F la force magnétomotrice en gilberts. Le flux Φ (en maxwells) est donné par la formule

$$\Phi = \frac{F R_x}{R R_m + R R_x + R_m R_x}. \qquad (5)$$

Le maximum Φ_0 correspond à $\qquad R_x = \frac{R R_m}{R_m - R}. \qquad (6)$

On règle de manière à réaliser ces conditions pour la position d'équilibre. Soient x la longueur variable de l'entrefer et x_0 la longueur à la position de zéro; n étant le nombre de spires, la force électromotrice induite sera

$$E = \frac{n \Phi_0}{2 x_0} \cdot \frac{dx}{dt} \text{ u. é. m.} \qquad (7)$$

ω_0 étant la pulsation du pendule, ε le coefficient d'amortissement, et ξ le mouvement imposé, l'équation du séismographe sera :

$$x'' + 2\varepsilon x' + \omega_0^2 x = -\xi''. \qquad (8)$$

Le mouvement imposé est supposé sinusoïdal $\xi = a \sin \omega t$. L'équation du galvanomètre est d'autre part :

$$\theta'' + 2\varepsilon_g \theta' + \omega_g^2 \theta = \frac{gE}{rm}. \qquad (9)$$

θ étant le déplacement angulaire, ε_g le coefficient d'amortissement, ω_g la pulsation, g la constante électrodynamique, r la résistance du circuit, m le moment d'inertie du galvanomètre.

On pose $\qquad b = \frac{gn\Phi_0}{2mrx_0} \qquad (10)$

et $\qquad Q = \frac{\omega^3}{(\omega_0^2 + \omega^2)\left[(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon_g^2 \omega^2\right]^{\frac{1}{2}}}. \qquad (11)$

Alors $\theta = abQ \sin(\omega t + \Delta)$. (11 *bis*)

Δ étant la différence de phase entre le mouvement du sol et le mouvement inscrit. Cette équation est analogue à celle du Galitzine : b correspond au coefficient de transformation k, et Q n'est autre que le terme désigné par U.

Constantes et résultats. — La masse est de 100 kgs., la période de 0ˢ,5. La force d'attraction de l'aimant sur l'armature a pour effet d'augmenter la période. S'il n'y avait pas une différence suffisante entre la tension des ressorts et la force d'attraction, l'appareil serait instable.

L'amplification étant très grande, on peut utiliser des galvanomètres ayant une période très différente de celle du pendule. Trois paires de bobines indépendantes ont été installées, ce qui permet, avec le même pendule, d'actionner, soit successivement, soit simultanément, trois galvanomètres différents, idée neuve et originale[1]. Les trois combinaisons suivantes ont été utilisées :

1° période du galvanomètre 0ˢ,2 amortissement critique,
2° — — 14ˢ — —
3° — — 14ˢ — très supérieur à l'amortissement critique.

Les courbes d'agrandissement présentent la même allure générale que celles du Galitzine, mais leurs maximums correspondent à des périodes d'une fraction de seconde. Ces maximums sont respectivement 100000, 50000 et 10000 pour les trois combinaisons. Les séismes voisins sont très bien inscrits, surtout avec la première combinaison, qui est par contre peu sensible aux ondes longues. Les deux autres sont plus adaptées à l'inscription des séismes éloignés.

L'auteur a construit en outre un instrument portatif de 10 kgs. et à période de 0ˢ,3, donnant des résultats analogues

1. Gütenberg (18, p. 74) avait inscrit simultanément sur la même feuille les oscillations de deux pendules ayant des périodes différentes.

à ceux des appareils usuels pour l'inscription des séismes locaux.

L'intérêt de cet appareil est indiscutable. Il appelle toutefois certaines réserves. D'abord on peut craindre que des agrandissements de 100000 et même de 10000 ne soient trop élevés pour l'usage journalier dans les observatoires ayant des usines dans leur voisinage[1]. D'autre part, l'auteur donne un tableau des valeurs des différences de phase correspondant aux différentes périodes. Très faibles pour les courtes périodes, ces différences deviennent importantes pour les périodes usuelles : c'est une conséquence de l'écart entre la période du pendule et celle du galvanomètre. Des études comparatives seraient nécessaires pour se rendre compte s'il ne résulte pas de ce fait un retard notable dans l'apparition de certaines phases.

B. Appareils à inscription mécanique.

D'après ce qui précède, le problème d'une bonne inscription des séismes voisins au moyen de la transmission galvanométrique semblerait résolu. Malheureusement, en dépit de l'intérêt incontestable que présentent les résultats obtenus par Wilip, Gütenberg et Benioff, il subsiste une grave objection. Si l'on veut séparer d'une façon suffisamment nette les ondes à courte période, on est forcé d'adopter un grand déroulement du papier. La vitesse de 30 mm. par minute, généralement choisie pour les Galitzine, devient trop petite : il faut la doubler ou la tripler. Lorsqu'il s'agit d'applications industrielles, cela ne présente aucune difficulté : on a utilisé des déroulements de plusieurs mètres par minute, la durée des inscriptions étant

1. Par contre, des agrandissements de cet ordre ont été utilisés antérieurement avec succès pour l'étude des vibrations artificielles. Wiechert en 1908 (**41**, p. 40 et **25**, p. 43) avait déjà obtenu une amplification de 50000. La sensibilité obtenue était telle que si on posait la main à plat à côté de l'appareil, les pulsations du cœur étaient inscrites! En 1924, F. Hubert (**20**, p. 134), pour l'étude des chutes de poids, a installé un appareil basé sur le même principe, mais donnant un agrandissement de 2 millions.

généralement très courte. Mais lorsqu'il s'agit d'appareils fonctionnant en permanence, le coût élevé du papier photographique oblige à abandonner l'inscription optique, et l'on est conduit à revenir à l'inscription sur noir de fumée pour l'étude des séismes voisins.

Pour équiper à cet effet un observatoire situé dans une région où les secousses sont fréquentes, mais de faible importance, il faut construire des appareils à grande amplification. L'agrandissement statique devant atteindre 1000 à 2000, pour maintenir le frottement dans des limites convenables, on est forcé d'avoir recours à de très grandes masses. Wiechert[1] avait déjà construit des appareils de 17 tonnes (Goettingen 1906 et Tacubaya[2] 1910), mais ces séismographes ne comportent que les composantes horizontales.

I. *Appareil de Quervain Piccard.*

Le premier en date des appareils à lourde masse muni de la composante verticale est celui que de Quervain et Piccard[3] (1923) ont établi à Zurich pour le service séismologique suisse, en vue de l'étude des petits séismes fréquents dans les Alpes.

Une masse de 21 tonnes est suspendue par 4 ressorts de façon à pouvoir se mouvoir librement dans tous les sens. La période aurait été trop courte ; un système de ressorts auxiliaires a permis de la porter à 1s,2. Le déroulement est de 90 mm. par minute, l'amortissement est magnétique. La compensation de température est obtenue par un dispositif hydraulique sur lequel je reviendrai plus loin.

De Quervain et Piccard[4] avaient construit auparavant (1922) un petit séismographe transportable pour l'étude des vibrations artificielles. Le principe est le même que celui du grand

1. Wiechert n'a donné sur son appareil de 17 tonnes que des indications extrêmement sommaires (voir **42**, p. 172).

2. Au sujet de l'appareil de Tacubaya, consulter Muñoz Lumbier (**25**, p. 19).

3. **29**, p. 32, et **30**, p. 12.

4. **28**, p. 8.

appareil; la masse est de 25 kgs., l'agrandissement est de 75 avec l'inscription sur noir de fumée. On peut le porter à 10000 en installant un dispositif d'inscription optique.

II. *Grand Pendule de Strasbourg.*

La construction d'un grand appareil, du même type que celui de Gœttingen, avait été autrefois projetée à Strasbourg : elle n'avait reçu qu'un commencement d'exécution. Quelques mois après l'armistice, M. Rothé, désireux de mettre en service un séismographe à lourde masse, décida d'utiliser à cet effet les éléments déjà préparés par les physiciens allemands qui avaient autrefois dirigé la station (une cuve cylindrique M de 1 m. 80 de hauteur sur 1 m. 80 de large, et des poutrelles d'acier G et R fixées dans les murs de l'une des salles). La construction devait être faite en deux étapes successives, pour des raisons budgétaires : 1° composantes horizontales; 2° composante verticale.

Il fallait immédiatement prévoir un dispositif permettant le fonctionnement des trois composantes : c'est pourquoi, renonçant à la suspension primitive, M. Rothé chercha à faire fabriquer 4 tiges terminées par des ressorts à boudin identiques, problème difficile à résoudre, sur lequel je reviendrai plus loin.

En entreprenant la construction de ce grand appareil, M. Rothé désirait se rapprocher autant que possible de l'appareil de Zurich. Le regretté M. de Quervain, alors directeur du service séismologique suisse, avait en effet sollicité le concours de la station de Strasbourg, pour l'étude en commun des petits phénomènes séismiques, fréquents dans les Alpes, et même dans les Vosges. C'est la raison pour laquelle les dispositifs d'amplification furent construits par la Maison Trüb-Täuber (Zurich) qui avait précédemment établi ces mêmes leviers pour l'appareil de Zurich, et devait, ultérieurement, fournir les séismographes des stations de Neuchâtel, Coire et Bâle.

Ce n'est qu'après la mise en fonctionnement des composantes

horizontales[1] que furent entreprises la construction et l'adapta-

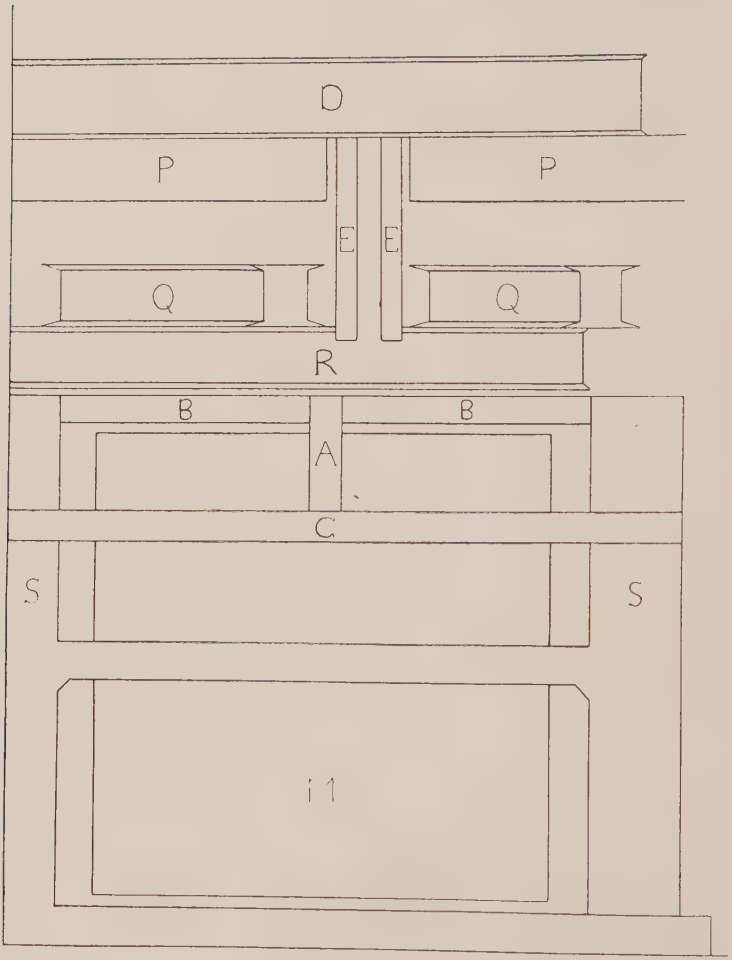


FIG. 12.

tion des organes de la composante verticale, travail que M. Rothé voulut bien me confier.

Le dispositif d'amplification[2] comprend une tige verticale G*a*

1. Voir pour celles-ci : E. Rothé et J. Lacoste, **32**, pp. 44-87.
2. Voir aussi fig. 17 et 27.

partant du centre de gravité (voir *fig. 13*) transmettant le mouvement à un premier levier *abc*, qui oscille autour d'un axe *b*

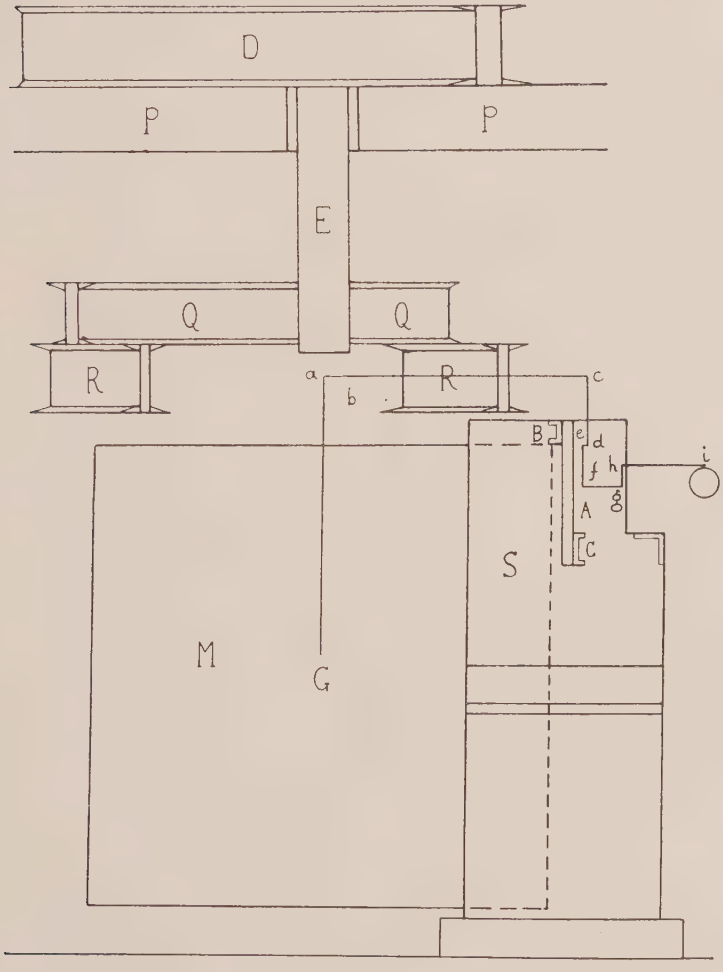


Fig. 13.

constitué par deux paires de lamelles d'acier croisées. Le mouvement est transmis par une deuxième tige de liaison verticale *cd* à un deuxième levier en équerre *def*, qui transmet lui-

même le mouvement par une tige de liaison horizontale *fg* au troisième levier portant la plume inscriptrice *hi*. L'amplifica-

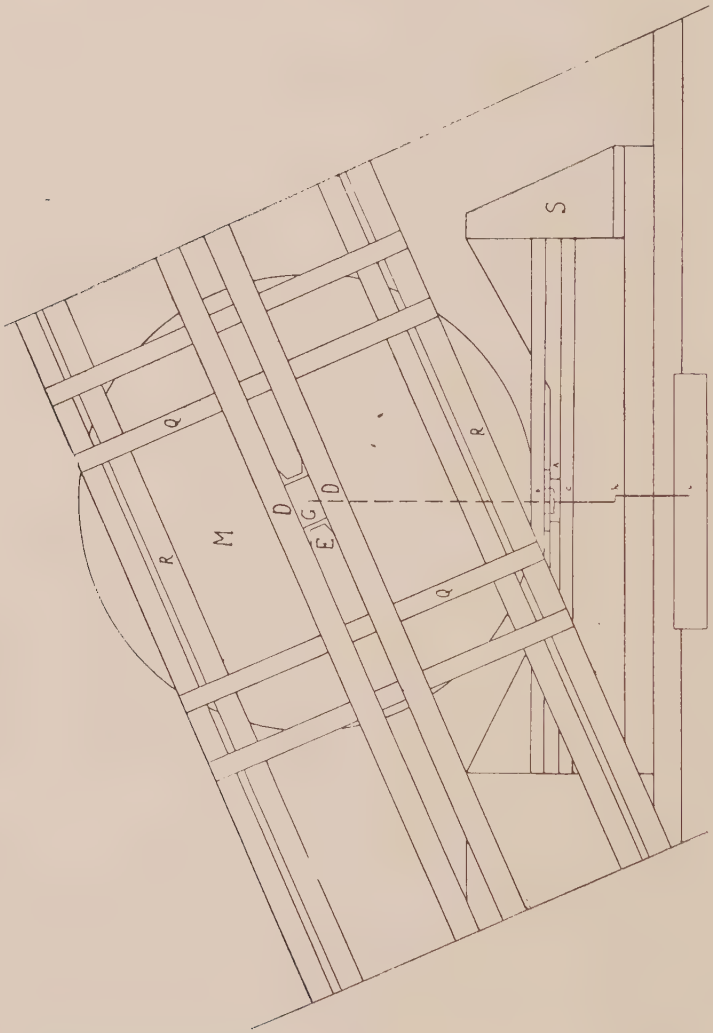


Fig. 14.

tion du premier levier est 10, du deuxième 15, et du troisième 20. Ces divers organes sont tout à fait analogues à ceux des composantes horizontales.

Ressorts. — Leurs dimensions sont les suivantes : nombre de spires 7, diamètre du fil 33 mm., diamètre du boudin 18 cm. Ils ont été construits, comme ceux de l'appareil de Zurich, par la Maison Baumann (Zurich), et avec le même acier; ils n'en diffèrent que par le nombre de spires (7 au lieu de 11). On était en effet astreint, par suite de l'exiguïté des lieux, à installer des ressorts plus courts que dans cet observatoire. Le modèle de la suspension est aussi un peu différent; tandis qu'à Zurich la caisse est suspendue par une tige unique, les 4 ressorts étant groupés au centre, à Strasbourg ils sont placés à la périphérie : de chacun d'eux part une tige s'attachant à la partie inférieure de la masse. Leurs extrémités supérieures sont fixées à des calottes en acier, boulonnées aux poutrelles du bâti.

La construction de tels ressorts n'est pas une fabrication courante; il est très difficile d'obtenir pour chacun d'eux des propriétés élastiques identiques : mais c'est une condition absolument indispensable. Aussi, bien qu'ils eussent déjà été soumis à des essais préalables en usine, on leur a fait subir, dès leur arrivée à Strasbourg, de nouvelles épreuves de traction. Trois d'entre eux se montrèrent satisfaisants; mais au cours des expériences le quatrième se déforma, et l'on dut pourvoir à son remplacement.

Construction de la composante verticale. Points fixes. — C'est fin juillet 1926 que, tous les leviers étant livrés, j'ai commencé la construction de la composante verticale.

Il est essentiel que les axes autour desquels oscillent les leviers soient bien fixes, surtout celui du levier primaire, car la moindre oscillation de ce dernier sera transmise jusqu'à l'inscripteur avec une amplification de 300 environ : son installation doit donc être spécialement soignée, sinon des perturbations risqueraient de se produire dans les inscriptions.

Après avoir étudié diverses solutions, je me suis arrêté à la suivante : deux poutrelles D en fer à U de 30 cm. de hauteur ont été placées au-dessus du plafond P de la salle; entre ce plafond et le toit de la station existe un espace de 1 mètre de hauteur environ, dont le rôle est de réduire les variations de

température dans les salles des instruments. La présence de poutres en ciment soutenant le toit a fortement gêné la mise en place de ces poutrelles : on est arrivé toutefois à les installer de façon à ce qu'elles portent sur toute la largeur de la pièce, afin de bien répartir la charge ultérieure. Une fois leur horizontalité assurée, elles ont été solidement boulonnées avec des cônes en fer noyés dans la maçonnerie. Sur ces deux poutrelles viennent se fixer deux fers descendants E entre lesquels est logée la pièce portant les lamelles qui constituent l'axe autour duquel oscille le levier primaire. Pour placer convenablement cette pièce il fallait connaître la position de la verticale passant par le centre de gravité. J'y suis parvenu en fixant la tige primaire à sa place, au moyen de la clef tubulaire prévue à cet effet. La tige étant calée, sa verticalité a été assurée à l'aide d'un niveau sphérique à bulle d'air fixé à sa partie supérieure au moyen d'une bague. Après quoi, décalant la caisse et la tige, j'ai vérifié que cette dernière restait bien verticale.

Le réglage des fers descendants était prévu en avant et en arrière et dans le sens de la hauteur : on avait pour cela ovalisé les trous des boulons les fixant aux poutrelles. De plus, un jeu avait été ménagé entre les fers pour le réglage latéral de la pièce : des plaques de tôle de 1, 2 et 5 mm. ont permis de la caler à l'endroit voulu.

Ce réglage n'a pu être terminé qu'une fois fixée la place du levier secondaire. Le point d'appui de celui-ci a été constitué par un fer à U vertical A fixé d'une part à un fer horizontal déjà existant B réunissant les deux piliers de ciment S et de l'autre à un nouveau fer à U horizontal C par lequel on a joint les parties supérieures des deux piliers en question. J'ai obtenu de la sorte un emplacement suffisamment rigide.

La place du troisième levier portant la plume avait été prévue à l'avance sur la plaque supportant les plumes des composantes horizontales : cet emplacement a permis de déterminer aisément la place du levier secondaire. J'ai fait alors une installation provisoire du levier primaire au moyen de lamelles d'acier épaisses. Le réglage des différentes pièces étant terminé, il n'est plus resté qu'à tout boulonner solidement. On a ensuite rem-

placé les lamelles provisoires épaisses par les lamelles définitives, amincies dans leur partie centrale.

Après quoi, j'ai libéré la cuve; divers frottements parasites s'étaient introduits par suite de déplacements des éléments de la charge, il fut facile d'y remédier. D'autre part, deux des ressorts frottaient contre les parois de leurs logements. Pour opérer les réglages il a fallu soulever la cuve au moyen d'un cric. La masse oscillant enfin librement, j'ai vérifié à nouveau que la tige primaire était bien verticale.

Ce travail, commencé fin juillet, a été terminé fin septembre.

Vérification des composantes horizontales. — L'inconvénient bien connu des instruments à plusieurs composantes, c'est la difficulté que l'on éprouve à rendre celles-ci parfaitement indépendantes. Aussi, les séismographes de petite et moyenne grandeur sont-ils généralement construits pour l'inscription d'une composante unique. Mais étant donnés les dimensions, la difficulté de construction et le coût élevé des grands appareils, on cherche à en tirer tout le parti possible : c'est pourquoi tous les instruments de ce genre construits depuis quelques années sont universels, c'est-à-dire disposés pour l'inscription des trois composantes.

Pour que celles-ci soient parfaitement indépendantes, il est nécessaire que le centre de gravité soit bien déterminé et que les tiges de poussée primaires soient orientées aussi rigoureusement que possible suivant les trois directions nord-sud, est-ouest et verticale. Une première vérification de l'indépendance des composantes horizontales avait été faite au moment de leur mise en marche. Mais la composante verticale ayant été installée après coup, il était indispensable de se rendre compte si aucune pertubation n'avait été apportée de ce fait aux composantes horizontales. Pour cela, je les ai replacées dans des conditions analogues à celles où elles se trouvaient auparavant (même période, même agrandissement, même amortissement), les divers éléments de la composante verticale étant démontés. Après quoi, j'ai remonté pièce à pièce les organes en question en vérifiant chaque fois les périodes des composantes horizon-

tales, au moyen de plusieurs séries de mesures de 20 oscillations. La précision des lectures étant de $\frac{1^s}{5}$, l'erreur n'excède pas $\pm 0^s,02$. Pour la composante EW, j'ai trouvé $2^s,00$ dans tous les cas. Pour la composante NS, les valeurs trouvées ont varié de $1^s,43$ à $1^s,46$. Sans la composante verticale, on avait $1^s,45$; avec l'installation complète de cette dernière, on avait $1^s,44$. Il n'y a donc aucune variation appréciable de la période. L'amplification n'ayant pas été touchée, il ne pouvait y avoir de variation de l'agrandissement.

On peut donc conclure que l'adjonction de la composante verticale n'a pas apporté de perturbation notable au bon fonctionnement des composantes horizontales.

Ces vérifications ont duré environ trois semaines.

Période des oscillations. — Il n'est pas possible de percevoir à l'œil nu les oscillations de la masse qui sont très courtes ; et même des visées avec une lunette à deux mètres de distance ne donnent pas de résultat satisfaisant. J'ai utilisé deux procédés pour la mesure de la période.

Le premier a consisté à fixer à l'avant de la caisse en A une lame d'acier coudée deux fois à 90°. L'extrémité H est terminée par une fourche entre les branches de laquelle est fixé un fil fin que l'on vise avec un microscope placé horizontalement et muni d'un micromètre. Les lectures ont été faites non seulement en semaine, mais aussi le dimanche, afin d'éliminer l'effet des perturbations industrielles ; elles ont toujours conduit à une valeur de $0^s,20$ pour la période. Pour une deuxième série de visées, j'ai eu recours à un procédé optique. A l'avant de la caisse, à la place de la pièce utilisée pour la mesure des constantes des composantes horizontales, j'ai fixé une petite lame d'aluminium *a* portant une colonnette *t* dans le genre de celles

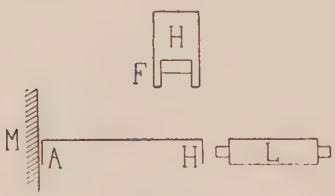


Fig. 15.

des appareils Mintrop, c'est-à-dire une tige filetée dont la position se règle par écrou et contre-écrou, portant à sa partie supérieure une cuvette destinée à supporter une pointe d'acier. Une autre pièce portant deux colonnettes *t* analogues a été solidement assujettie au socle de béton. Au repos les trois cuvettes déterminaient un plan sensiblement horizontal : sur elles reposait l'équipage *e* portant le miroir, formé d'une mince plaque d'aluminium recourbée en équerre à l'avant,

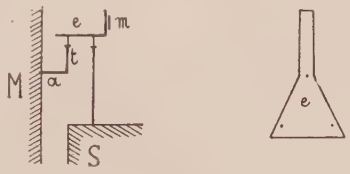


Fig. 16.

et terminée à l'arrière par une pointe constituant un contrepoids. La plaque était traversée par trois épingles solidement fixées, reposant sur les cuvettes. A l'avant, un miroir plan *m* était fixé verticalement avec de la cire molle. En visant avec une lunette à échelle, j'ai trouvé pour la cuve oscillant seule une période de $0^s,20$. En remettant successivement à leur place les trois leviers et la plume et en opérant par les deux procédés indiqués ci-dessus, j'ai encore obtenu la même valeur de $0^s,20$.

On peut donc conclure que l'adjonction des leviers n'amène pas de perturbation appréciable dans la période des oscillations de la composante verticale.

Coefficient d'élasticité du système. — Après avoir enlevé les différents leviers, j'ai cherché à déterminer de combien s'abaissait la masse pour une charge donnée. Avec le microscope il était impossible de faire de bonnes mesures à moins de faire descendre sur la masse des poids considérables.

J'ai donc eu recours exclusivemenent au deuxième procédé. L'échelle était placée à 2 m. 50, le bras de levier du miroir était de 1 cm. Les pièces mobiles étant très légères ne pouvaient apporter aucune perturbation au système. Pour obtenir sur l'échelle une déviation de 2 mm., il a fallu charger la masse de 3 kgs. (cette masse additionnelle étant posée sur la tête de poussée, donc sur la verticale passant par le centre de gravité).

Il est facile de déterminer l'agrandissement obtenu par la formule $V_0 = \frac{Ma}{mL}$, où M désigne la masse du pendule, m la masse additionnelle, L la longueur du pendule, et a la déviation sur l'échelle correspondant à la charge m. Ici $V_0 = 1270$ (je rappelle que $M = 19{,}3$ tonnes). L'allongement est donc de $0^{\mu}{,}53$ pour 1 kg. Le coefficient d'élasticité du système $\Lambda = 1850 \times 10^7$. Si l'on porte cette valeur dans la formule exprimant la période en fonction de la masse et du coefficient d'élasticité du système, $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\Lambda}}$, il vient $T = 0^{s}{,}201$. Or dans mes mesures j'ai obtenu $T = 0^{s}{,}20 \pm 0^{s}{,}02$. L'accord est donc satisfaisant.

M. Berlage, qui a collaboré à l'installation des composantes horizontales, avait mesuré au préalable le coefficient d'élasticité des ressorts. L'allongement du système correspondait à $0^{\mu}{,}43$ par kg. D'où les valeurs $\Lambda = 2300 \times 10^7$ et $T = 0^{s}{,}18$. Ces mesures, faites d'ailleurs sommairement, avaient eu lieu deux ans avant les miennes. Elles avaient surtout pour but de vérifier l'identité des quatre ressorts.

L'élasticité des ressorts s'est donc modifiée avec le temps d'une façon appréciable. Il n'y a d'ailleurs pas lieu de s'en étonner, car on sait que tout ressort tendu par une charge constante continue à travailler pendant un certain temps avant d'atteindre son allongement définitif.

Mesure de l'agrandissement. — Après adjonction des leviers, il restait à mesurer l'agrandissement du séismographe. Le principe consiste à déposer une petite masse sur la tête de poussée, à mesurer la déviation a produite sur la feuille ; l'agrandissement se calcule comme je viens de le faire précédemment. Il est très incommode de placer la masse en cette position, alors qu'il est très simple de l'installer à l'extrémité du premier levier, comportant une surface plane. L'amplification du levier étant égale à 10, il suffira de placer à l'avant du levier une masse 10 fois moins forte que celle que l'on aurait placée au centre, pour obtenir les mêmes résultats. J'ai vérifié

que les deux procédés donnaient bien des résultats identiques, et dans la suite j'ai toujours utilisé le plus commode.

Pour une masse de 100 gr. placée au bout du premier levier, équivalant à une masse de 1 kg. placée au centre, j'ai obtenu sur la feuille une déviation de 2 mm. 5, ce qui correspond à un agrandissement $V_0 = 4750$. Cette valeur est évidemment élevée. Je montrerai plus loin que le fait d'installer un dispositif pour augmenter la période la réduit dans de fortes proportions.

Amortissement et frottement. — Étant donné la petitesse de la période obtenue, l'amortissement était extrêmement faible et sa mesure ne présentait pas d'intérêt. D'autre part, les vibrations d'origine industrielle presque ininterrompues ne permettaient pas de mesurer convenablement le frottement. Je reviendrai sur la question du frottement dans l'exposé relatif à la mesure des constantes après l'installation du dispositif d'augmentation de période.

Vérifications diverses. — Il était nécessaire de s'assurer :

1° Si des mouvements horizontaux ne risquaient pas d'être transmis à la composante verticale et inscrits comme vibrations verticales ;

2° Si le mouvement de la masse était bien transmis fidèlement par l'ensemble des leviers et si les oscillations propres de ces derniers ne risquaient pas d'apporter des perturbations ;

3° Si enfin les mouvements verticaux de la masse étaient bien les mêmes en chacun de ses points.

1° Les mouvements horizontaux qui pourraient se produire au troisième levier n'ont pas d'importance, à cause de sa faible amplification. La rigidité de la fixation du premier levier est suffisante pour que rien ne soit à craindre de ce côté-là. Par contre, si l'on donne des chocs à la poutrelle horizontale qui supporte le point d'appui du deuxième levier, on voit des déviations sur la feuille. Je me suis demandé si des vibrations propres de cette pièce ne pourraient pas troubler les inscriptions

de la composante verticale. Le deuxième levier, en équerre, muni de son contre-poids, constitue en effet un pendule horizontal. Je l'ai séparé du premier levier par suppression de la tige de liaison secondaire. Muni de la tige tertiaire AB, du levier tertiaire BCD et de la plume DE, le second levier constitue un petit séismographe apte à transmettre les vibrations horizontales normales à son axe (dont la projection est en O).

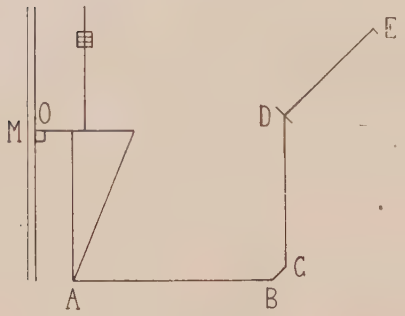


Fig. 17.

Sa période est de $0^s,65$, son agrandissement, il est vrai, ne dépasse pas 30. Sa masse est d'une vingtaine de grammes. J'ai obtenu plusieurs inscriptions dans ces conditions en prenant la précaution de réduire le plus possible le frottement de la plume. Celle-ci avait été placée au voisinage de l'équilibre indifférent, et une butée que j'avais disposée au-dessus l'obligeait à redescendre sur le papier après les interruptions de minute. La plume avait été tellement allégée que sans cette précaution, elle ne serait pas retombée sur la feuille.

Des chocs donnés en différents points ont montré que ce pendule oscillait normalement. Le remontage du mouvement d'horlogerie, par exemple, produisait des déviations très nettes. Mais en laissant le système inscrire librement, j'ai obtenu une ligne droite, même aux heures où l'activité industrielle était la plus intense. Il ne semble donc pas qu'il y ait de perturbations à craindre de ce fait.

Si l'on donne des chocs au pendule suivant l'une des composantes horizontales (en appuyant sur l'un des leviers par exemple), la composante verticale n'inscrit rien. Mais si l'on donne un choc dans une direction quelconque, la masse se met à osciller suivant un mouvement de balancement (période 1^s, 8) qui se prolonge au moins pendant plusieurs minutes, et d'autant

plus longtemps que le choc a été plus fort. Ce mouvement est inscrit par les trois composantes, et les dispositifs d'amortissement sont impuissants à l'arrêter. Il affecte la forme de battements très réguliers, comme ceux produits par la superposition de deux mouvements sinusoïdaux de périodes très voisines. Ce phénomène a été également signalé pour l'appareil de Zurich. Il se produit aussi pour le vertical Wiechert de 1200 kgs., parfois spontanément d'ailleurs au cours de certains séismes.

2° Afin de voir si le mouvement de la masse est bien transmis fidèlement par les leviers, j'ai installé un dispositif d'inscription optique, permettant d'enregistrer les vibrations verticales telles qu'elles existent au sommet de la tête de poussée : elles peuvent être considérées comme équivalant à celles du centre de gravité. Un essai fait au moyen d'un dispositif analogue à celui utilisé plus haut sur la mesure des allongements des ressorts ne m'a donné aucun résultat, l'agrandissement obtenu étant insuffisant.

C'est pourquoi j'ai introduit un levier supplémentaire ABC. Il a été construit en aluminium : son poids, très faible, ne pouvait avoir d'influence notable sur les résultats. Sa partie arrière est une plaque traversée par trois épingles et terminée par un contre-poids Q permettant de l'équilibrer. La partie avant est une série de quatre tubes d'aluminium de diamètres décroissants, enfilés les uns dans les autres (disposition analogue à celle des plumes inscriptrices). Ce levier est coudé à sa partie antérieure et supporte en C l'une des pointes de l'équipage du miroir M_1 ; les deux autres pointes reposent sur deux colonnettes solidement assujetties à une traverse du bâti D. Le levier porte lui-même à l'arrière trois pointes dont deux reposent en P sur deux colonnettes assujetties par l'intermédiaire d'une plaque d'aluminium Y à la pièce X supportant l'axe du premier levier et dont l'autre pointe repose sur une colonnette R fixée à la tête de poussée. Sur le miroir plan M_1 tombe le faisceau lumineux issu de la lampe S, interrompu toutes les minutes pendant 2s. Le faisceau réfléchi traverse deux lentilles convergentes[1] L_1 et L_2,

1. Caractéristiques des lentilles : L_1, diamètre 4 cm, distance focale 1 m.; L_2, diamètre 8 cm., distance focale 30 cm.

il est ramené sur l'inscripteur I par un miroir plan M_2 incliné à 45°; il est rendu ponctuel par une lentille cylindrique *l* placée au-dessus de l'enregistreur.

Le miroir[1] à 45° était fixé en haut d'une échelle double sur un support pouvant être déplacé dans toutes les directions ; les barreaux de l'échelle permettaient de disposer convenablement la lentille L_2; il était aisé de fixer la lentille L_1 et la lampe S au bâti de l'appareil. L'enregistreur utilisé avait autrefois servi pour le Galitzine ; comme le faisceau lumineux descendait ver-

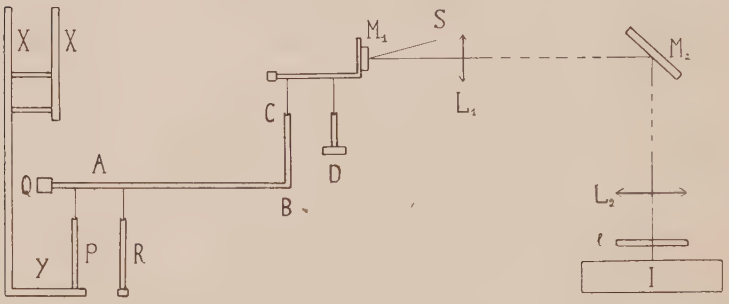


Fig. 18.

ticalement, j'ai dû déplacer la lentille cylindrique et la mettre au-dessus du cylindre, ainsi que le montre la figure. Le mouvement a été accéléré en allégeant le régulateur, de façon à obtenir un déroulement de 60 mm. par minute.

Des inscriptions ont d'abord été faites masse seule, puis j'ai replacé les divers leviers successivement ; aucun changement d'allure n'est apparu. Après quoi, tous les leviers étant remontés, j'ai pu obtenir simultanément l'inscription optique et l'inscription mécanique et faire des comparaisons. L'agrandissement de l'inscription optique a été mesuré par le procédé habituel, en plaçant une masse au bout du premier levier. Pour l'inscription optique on a trouvé $V_0 = 4300$, pour l'inscription mécanique, $V_0 = 4750$.

1. Les premiers essais avaient été faits avec un prisme à réflexion totale; j'ai préféré lui substituer un miroir à 45° qui donnait un champ plus étendu.

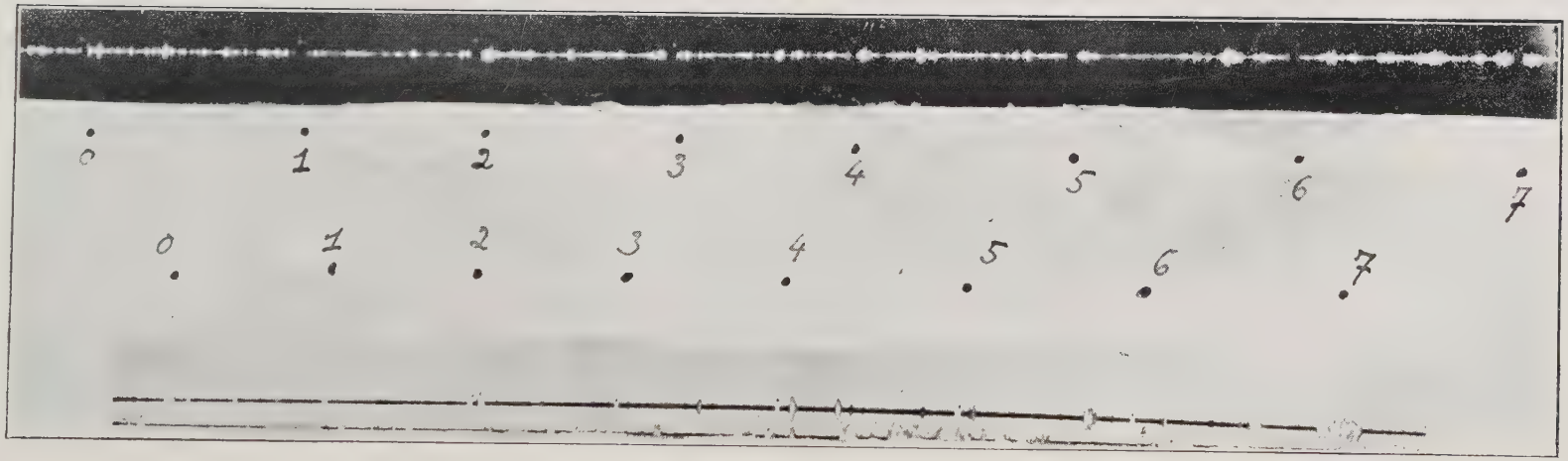


Fig. 19.

Comparaison de l'inscription sur noir de fumée avec l'inscription optique du mouvement à la tête de poussée.
D'un point au point suivant, l'intervalle est 1 minute.

Sur les inscriptions faites en même temps, on retrouve exactement les mêmes trains d'ondes, avec leurs particularités diverses, et il n'existe pas sur l'une des inscriptions des trains que l'on ne retrouve pas sur l'autre. A l'œil, les inscriptions peuvent sembler accuser des divergences : celles-ci tiennent à la différence des modes d'inscription. Sur le noir de fumée, en effet, figurent maints petits détails qui disparaissent dans l'épaisseur du trait sur les inscriptions photographiques. Par contre le frottement, négligeable dans les procédés optiques, joue un rôle important dans les inscriptions mécaniques, et cela d'autant plus que l'amplitude est plus considérable. Par suite, les grandes amplitudes paraissent relativement plus importantes sur le papier photographique que sur le noir de fumée. Si l'on s'arrête aux amplitudes moyennes, et qu'on les compare sur les deux inscriptions, on voit que leur rapport est très voisin de celui des agrandissements.

3° Afin de vérifier si le mouvement de la masse est bien le même en tous les points, et s'il n'existe pas de mouvements de rotation préjudiciables à la correction des inscriptions, j'ai fait deux nouvelles séries d'inscriptions. Dans l'une le miroir était placé à l'avant de la

FIG. 20.

a mouvement pris à la tête de poussée.
b — — en avant, à la hauteur du centre de gravité.
c mouvement pris au bord de la cuve.
d — — en avant, à la hauteur du centre de gravité.

cuve, à la hauteur du centre de gravité, dans l'autre il était placé en haut et à gauche de la cuve. Dans chaque cas, j'ai utilisé un dispositif optique analogue à celui décrit précédemment. Le montage destiné à l'inscription du mouvement pris en haut de la tête de poussée ayant été conservé, j'ai pu obtenir dans chaque cas sur le cylindre enregistreur une double inscription.

Une difficulté à vaincre dans ces deux séries d'expériences a été due au fait que les miroirs placés dans ces conditions subissent les oscillations horizontales de la masse. J'ai dû laisser un certain jeu aux pivots des miroirs, afin d'éviter qu'ils fussent bloqués rapidement par les mouvements horizontaux : mais alors, au bout d'un temps assez court, l'axe de rotation du miroir se déplaçait et l'image sortait du champ. Je n'ai donc pu avoir que des inscriptions assez brèves, et je ne suis parvenu à les obtenir qu'après de longs et nombreux réglages. La dernière série surtout, par suite du manque de place, s'est montrée particulièrement délicate.

Les agrandissements étaient 1100 dans le premier cas et 2150 dans le second. La comparaison des inscriptions de l'avant et du bord de la cuve n'a montré aucune différence apparente avec celles de la tête de poussée.

On peut donc conclure que le mouvement vertical est bien le même en tous les points de la masse, et que le mouvement du sol est transmis fidèlement par le dispositif d'amplification.

La période étant très courte, et l'agrandissement étant élevé, les inscriptions étaient complètement brouillées pendant la journée par suite des vibrations d'origine industrielle. Il était donc indispensable d'obtenir une période plus élevée : j'exposerai dans le prochain chapitre le principe auquel j'ai fait appel, le dispositif que j'ai adopté, et les résultats que j'ai obtenus.

CHAPITRE III

OBTENTION D'UNE PÉRIODE CONVENABLE

Le premier problème qui se pose à propos de la construction des séismographes verticaux est celui de l'obtention d'une période convenable. On le résout d'une façon différente suivant que la masse est fixée à un bras sur lequel vient s'attacher le ressort (première catégorie), ou bien qu'elle est attachée directement au ressort (deuxième catégorie). Dans ce dernier cas, il faut faire appel à une force auxiliaire, tandis que dans le premier on peut arriver au résultat cherché par un choix convenable des dimensions des bras de levier et des divers éléments de l'appareil. J'examinerai d'abord le premier cas, en raison de sa plus grande simplicité.

1re Catégorie.

Elle comprend les anciens appareils Ewing et Gray, le Wiechert de 80 kgs., et enfin le Galitzine.

I. *Appareil Ewing.*

Dans le cas de l'appareil Ewing, le ressort AH s'accroche directement au bras OM, le centre de gravité de la masse étant en M. Il est très long par rapport à son bras de levier OH. Supposons que la masse subisse un petit déplacement, et que son centre de gravité vienne en M′, le ressort prend la position AH′ : on est en droit de négliger sa rotation, et de considérer son bras de levier comme constant.

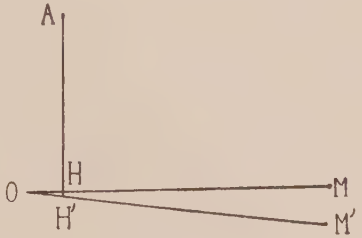


Fig. 21.

La formule donnant la période est alors

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\Lambda a^2}}, \qquad (12)$$

K étant le moment d'inertie du système par rapport à l'axe de rotation O, Λ le coefficient d'élasticité du ressort, et a sa distance à l'axe. Pour augmenter T, il suffit soit d'augmenter K, soit de diminuer Λ ou a. Les valeurs de K et de Λ sont limitées par le fait qu'on ne peut dépasser certaines dimensions pour l'appareil; étant donnés la masse et le ressort, en diminuant a, on devrait pouvoir atteindre une période aussi grande qu'on le désire. En fait, on arrive assez vite à une limite au delà de laquelle l'appareil se montre instable.

II. *Appareil Galitzine.*

Mais si le ressort n'est plus très long par rapport à son bras de levier, la formule ci-dessus n'est plus applicable. Quand la

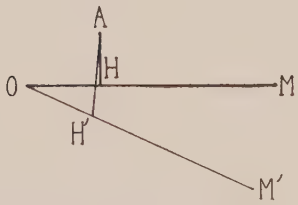


Fig. 22.

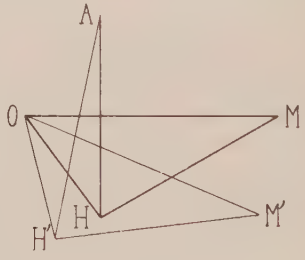


Fig. 23.

masse se déplace, le ressort décrit un angle de rotation appréciable et son bras de levier diminue lorsque sa tension augmente, comme on le voit sur la figure 22 : si la masse descend de M en M', le ressort prend la position AH' et son bras de levier devient OH', plus petit que OH.

L'effet sera encore plus marqué si le ressort, au lieu de s'attacher directement au bras, est fixé en dessous : le petit Wiechert

de 80 kgs.(1) et le Galitzine(2) sont basés sur ce principe (*fig.* 23). Un tel montage a pour effet d'augmenter l'angle de rotation du ressort pour un déplacement donné MM′ de la masse, et par suite d'obtenir une plus forte diminution du bras de levier lorsque la tension croît.

La formule devient $$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\Lambda a^2 - F_0 h\left(1 - \frac{h}{Q}\right)}}, \quad (13)$$

où F_0 représente la tension du ressort à la position de zéro, Q sa longueur initiale, et h la distance de l'extrémité inférieure du ressort au bras OM. En faisant $h = 0$, on retrouve la formule (12) relative à l'appareil Ewing.

On voit qu'avec ce dispositif on obtiendra une période plus élevée que dans le cas précédent. Les conditions les plus favorables seront obtenues pour $h = \frac{Q}{2}$. Alors on aura

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\Lambda a^2 - F_0 \frac{h}{2}}}. \quad (14)$$

C'est dans ces conditions que fonctionne l'appareil Galitzine; en fait on peut s'en écarter assez notablement sans que la période varie beaucoup(3).

Wilip, dans l'intention de rendre l'appareil plus symétrique, a ajouté un deuxième ressort attaché au-dessus du bras. Les indices 1 se rapportant au premier ressort et les indices 2 au second, la formule s'écrira ainsi :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\Lambda_1 a_1^2 + \Lambda_2 a_2^2 - F_1 h_1\left(1 - \frac{h_1}{Q_1}\right) + F_2 h_2\left(1 + \frac{h_2}{Q_2}\right)}}. \quad (15)$$

Ce deuxième ressort a pour effet de réduire la période.

1. **35**, p. 449, voir aussi fig. 8, p. 12.
2. **13**, p. 1, voir aussi fig. 9, p. 14.
3. **9**, p. 264.

En résumé, il est facile d'augmenter la période des appareils de la première catégorie : *il suffit de faire agir le ressort de telle manière qu'à un accroissement de sa tension corresponde une diminution de son bras de levier.*

2e Catégorie.

Elle comprend le premier appareil de Comrie, le Wiechert de 1200 kgs., le grand et le petit de Quervain-Piccard, et le grand pendule de 19 tonnes de Strasbourg.

La période est donnée par la formule simple

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\Lambda}} \qquad (16)$$

où M désigne la masse, Λ le coefficient d'élasticité du ressort. Pour augmenter T il faut faire croître M et diminuer Λ, ce qui conduit à allonger le ressort. Mais pour atteindre des périodes convenables, il faudrait donner au ressort une longueur vraiment exagérée. Force est donc d'avoir recours à un procédé indirect.

Le principe consiste à faire intervenir une force auxiliaire, réglable, agissant par l'intermédiaire d'un levier coudé. Elle doit être disposée de telle manière que si on fait subir un déplacement à la masse du séismographe, son bras de levier augmente; de plus, le couple déterminé par cette force doit tendre à écarter le système de sa position de zéro. Ce principe est dû à Tamaru[1] : il est à la base du dispositif d'augmentation de période de tous les appareils de la deuxième catégorie.

I. *Appareil Straubel.*

Les forces auxiliaires auxquelles on fait appel sont des poids qu'on peut faire coulisser sur le levier qui les porte. Il y en a

1. **38**, p. 637 et **39**, p. 167.

deux; ils sont égaux et symétriquement disposés par rapport à la verticale passant par le centre de gravité de la masse principale M. Je n'en indique qu'un sur la figure : soit m sa masse. Supposons qu'on dépose sur la grande masse une surcharge dP · il en résultera un allongemement dL. Le poids auxiliaire entre en jeu. Son moment est $mgb\ d\theta$, b désignant la distance OB de l'axe de rotation au centre de gravité du poids, et $d\theta$ l'angle de rotation du levier OB. En posant OA $= a$, on a $d\theta = \frac{d\mathrm{L}}{a}$.

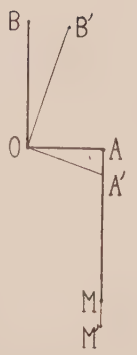


Fig. 24.

L'équation d'équilibre sera donc :

$$(\mathrm{M}g + d\mathrm{P})\,a - \Lambda(\mathrm{L} + d\mathrm{L})\,a + mg\frac{b}{a}\,d\mathrm{L} = 0 \qquad (17)$$

d'où

$$d\mathrm{P} = \left(\Lambda - mg\frac{b}{a^2}\right) d\mathrm{L}$$

et

$$\mathrm{T} = 2\pi\sqrt{\frac{\mathrm{M}}{\Lambda - \frac{b}{a^2}mg}}. \qquad (18)$$

Pour faire croître la période, il suffit de diminuer le bras du levier OA, d'éloigner le poids de O, ou encore d'augmenter le poids auxiliaire.

II. *Appareil Wiechert de 1200 kgs.*

Dans tous les autres appareils de la deuxième catégorie, les forces auxiliaires sont fournies, non plus par des poids, mais par des ressorts à boudin dont on peut faire varier la tension. Les figures 25 et 26 représentent schématiquement la construction installée sur le Wiechert.

Une tige de poussée OA part du centre de gravité O, et le mouvement se transmet par un premier levier AC oscillant autour de l'axe B. Une tige CD transmet le mouvement par

un bras de levier DE au dispositif d'augmentation de période comprenant deux ressorts, dont je schématise l'un par la droite GF. Il est fixé d'une part à un point G que l'on peut déplacer pour régler la tension, et de l'autre il commande l'extrémité F d'une pièce en forme de fléau de balance par l'intermédiaire de deux fils d'acier (voir *fig.* 26). Le deuxième ressort est symétrique du premier par rapport à DE et s'attache de la même façon à l'autre extrémité du balancier.

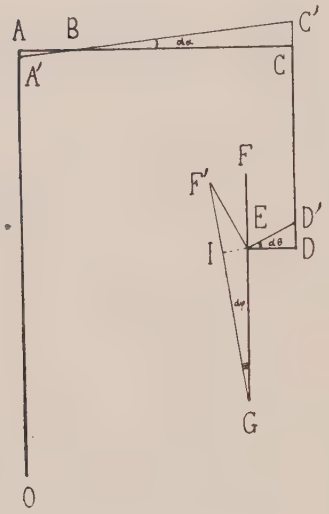


Fig. 25.

Pour simplifier l'écriture, je ferai le calcul comme si les huit ressorts de suspension du vertical Wiechert étaient remplacés par un ressort unique de coefficient d'élasticité Λ, l'allongement initial étant L. De même les deux ressorts auxiliaires seront supposés remplacés par un seul, λ et l étant les quantités correspondant à Λ et L. Posons AB = a, BC = b, DE = c, EF = d, GE = D.

Dans la position d'équilibre, DE est horizontale et EF est verticale. Le bras de levier des ressorts auxiliaires étant nul, le moment de leurs forces de tension est égal à zéro. P étant le poids de la masse, l'équation d'équilibre se réduit donc à P = Λ L.

Si on dépose sur la masse une surcharge dP, l'équilibre se trouvera modifié. Le levier AC prend la position A'C' et tourne d'un angle $d\alpha$; la tige CD vient en C'D'; et ED vient en ED' et tourne d'un angle $d\theta$. EF vient en EF', et le ressort auxiliaire prend la position GF', après avoir tourné d'un angle $d\varphi$[1].

1. Dans les calculs relatifs au petit appareil de Quervain (**2**, p. 449 et **6**, p. 154), on néglige la rotation des ressorts auxiliaires. Une telle façon de procéder conduirait, pour le Wiechert, à une erreur relative de plus de 1/10.

La masse s est abaissée de $dL = a\,d\alpha$. D'autre part, les ressorts auxiliaires se sont raccourcis d'une quantité dl, extrêmement petite. En effet,

$$dl = d + D - \sqrt{d^2 + D^2 + 2\,D d \cos d\theta}. \qquad (19)$$

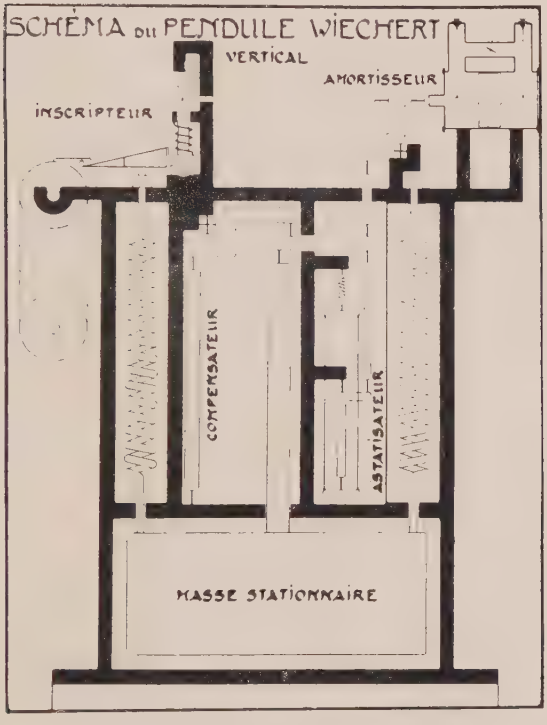


Fig. 26.

Si, dans le développement en série de cos $d\theta$, on néglige les termes du 2e degré, on est conduit à considérer dl comme nul, et à admettre que la tension des ressorts auxiliaires reste constante et égale à λl. Je reviendrai plus loin sur l'erreur entraînée par cette approximation.

Calculons le moment de cette tension. Le bras de levier est $El = D d\varphi$. Calculons $d\varphi$ en fonction de $d\theta$.

On a $$\frac{D}{\sin(d\theta - d\varphi)} = \frac{d}{\sin d\varphi}. \qquad (20)$$

On en tire $$d\varphi = \frac{d}{D+d} . d\theta \qquad (21)$$

et $$EI = \frac{Dd}{D+d} . d\theta . \qquad (22)$$

Or, les moments des tensions en D′ et en I sont égaux. Soit t la tension en D′. On a :

$$ct = \lambda l \frac{Dd}{D+d} d\theta \qquad (23)$$

λl est la tension des ressorts auxiliaires que je désignerai par f.

Donc $$t = \frac{Dd}{c(D+d)} f d\theta . \qquad (24)$$

En C′ et en D′, les tensions sont les mêmes. D'autre part, les moments de tensions en A′ et en C′ sont égaux. Soit τ la tension en A′. On a $\tau a = tb$ (25)

D'où $$\tau = \frac{Dd}{D+d} \frac{b}{ac} f d\theta . \qquad (26)$$

Or $CC' = DD'$ et $b d\alpha = c d\theta$.

Donc $$\tau = \frac{Dd}{D+d} \frac{b^2}{ac^2} d\alpha . \qquad (27)$$

L'équation d'équilibre sera :

$$(L + dL)\Lambda - \frac{Dd}{D+d} \frac{b^3}{ac^3} f d\alpha = P + dP . \qquad (28)$$

Donc $$dP = \left(\Lambda - \frac{Dd}{D+d}\frac{b^2}{a^2c^2}f\right)dL. \qquad (29)$$

Or on a $T = 2\pi\sqrt{M\frac{dL}{dP}}$, expression de la période T en fonction de dP et de dL.

Donc $$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{\Lambda - \frac{Dd}{D+d}\frac{b^2}{a^2c^2}f}}. \qquad (30)$$

Cette formule est analogue à celle de l'appareil Straubel.

En posant[1] $$\frac{Dd}{D+d}\frac{b^2}{a^2c^2} = k, \qquad (31)$$

l'équation prend la forme simple :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{\Lambda - kf}}. \qquad (32)$$

On voit donc qu'en faisant croître f, on peut augmenter T. Théoriquement, on devrait pouvoir atteindre une période aussi grande que l'on veut : en fait, on ne peut dépasser une certaine limite, au delà de laquelle l'appareil est instable.

L'expérience montre que la méthode aboutit à des résultats positifs, mais le calcul n'est pas complet.

1° J'ai admis plus haut que la tension des ressorts auxiliaires restait constante au cours des oscillations du système. Un exemple va montrer quel est l'ordre de grandeur de l'erreur entraînée par cette approximation. Si, dans le développement

1. Il faut noter que k n'est pas une constante, puisque, quand on tend les ressorts auxiliaires, D augmente. On doit mesurer D pour chaque cas particulier examiné et en déduire la valeur de k. Il y a, d'autre part, intérêt à rendre k le plus grand possible, afin que les tensions mises en jeu ne soient pas trop élevées.

en série de cos $d\theta$ on s'arrête au terme du deuxième degré, on aura :

$$dl = d + D - \sqrt{d^2 + D^2 + 2dD\left(1 - \frac{d\theta^2}{2}\right)}. \qquad (33)$$

Or $$d\theta = \frac{b}{c}\, d\alpha = \frac{b}{ac}\, dL,$$

donc $$dl = d + D - \sqrt{d^2 + D^2 + 2dD\left(1 - \frac{b^2}{a^2 c^2}\frac{dL^2}{2}\right)}. \qquad (34)$$

Ici $a = 3$ cm., $b = 14$ cm,5, $c = 4$ cm,5, $d = 20$ cm. Pour une période de l'appareil $T_0 = 3^s,5$, on a $D = 38$ cm. Pour une valeur $dL = 0$ cm,03 (déplacement du sol déjà très important), on déduit des données ci-dessus une valeur $dl = 14\ \mu$.

Si on se reporte au tableau I (voir p. 52), on voit que la variation relative de la tension des ressorts auxiliaires, pour un tel allongement, est légèrement supérieure à 1 °/₀. Pour la grande majorité des déplacements du sol que l'appareil est destiné à inscrire, elle sera encore plus petite. L'approximation faite est donc légitime.

Dans le cas de l'appareil Straubel, les forces auxiliaires sont des poids : elles restent donc constantes. La petite variation de la tension des ressorts auxiliaires n'est pas un élément nécessaire au fonctionnement du dispositif : c'est une conséquence de l'utilisation des ressorts à boudin. Les conditions nécessaires et suffisantes pour que le dispositif d'augmentation de période fonctionne sont les suivantes :

a) *Le bras de levier doit croître quand le système est écarté de sa position de zéro ;*

b) *Le couple déterminé par les forces auxiliaires (poids ou ressorts) doit tendre à écarter le système de sa position de zéro quand la masse du séismographe subit un déplacement.*

On peut remarquer que le dispositif est symétrique ; l'appareil étant au zéro, un déplacement de la masse, que ce soit vers

le haut ou vers le bas, provoquera une diminution de la tension des ressorts auxiliaires. Cette particularité n'a pas d'équivalent pour les appareils de la première catégorie.

2° Les calculs faits plus haut ne tiennent pas compte du rôle des organes de transmission et d'amplification. Ces diverses pièces constituent en réalité des pendules supplémentaires, ayant chacun sa période propre déterminée : *a*) par son moment d'inertie; *b*) par les propriétés élastiques des liaisons (lamelles d'acier croisées constituant les axes de rotation, pièces en fil d'acier destinées à permettre le jeu des tiges de transmission). Tous ces éléments réagissent les uns sur les autres, et finalement la période du séismographe est fonction de tous ces facteurs. Le rôle de chacun d'eux ne peut être établi mathématiquement d'une façon simple.

J'ai cherché à déterminer leur effet global par une série de mesures effectuées sur le vertical Wiechert de 1200 kgs.

1° *Étude des ressorts auxiliaires.* — Le dispositif étant démonté, j'ai pu étudier séparément les ressorts auxiliaires. Chacun d'eux, attaché sur un support, a été soumis à des charges alternativement croissantes et décroissantes, pour éliminer l'effet d'hystérésis, d'ailleurs assez faible. Après divers essais préliminaires, j'ai exécuté les mesures définitives avec des charges comprises entre 100 grammes et 2500 grammes, variant de 100 en 100 grammes. L'extrémité inférieure du ressort était visée au moyen d'un petit cathétomètre; je me suis contenté de mesurer les allongements à 1/10 de mm. près : les variations observées d'une expérience à l'autre, dues probablement à de petites variations de température, montrent qu'il eût été illusoire de chercher une plus grande précision.

Le tableau I indique les résultats obtenus pour le ressort inférieur (pour le ressort supérieur, ils ont été analogues). Dans la colonne 1 figurent les charges exprimées en grammes. La valeur des allongements (différence entre la longueur du ressort sous la charge indiquée et sa longueur à vide) est indiquée en millimètres, dans les colonnes 2 et 4 pour les charges croissantes, dans les colonnes 3 et 5 pour les charges décrois-

TABLEAU I

Dispositif d'augmentation de période du Vertical Wiechert de 1200 Kgs.

Etude du ressort inférieur. $\theta = 4°,8$ à $5°,0$

1	2	3	4	5	6	7
	M	D	M	D	Moyenne	λ
100...	0,4	0,6	0,5	0,6	0,52	—
200...	1,0	1,3	1,3	1,3	1,22	—
300...	1,6	2,2	1,9	2,1	1,95	—
400...	2,7	2,6	2,9	2,9	2,82	—
500...	3,9	3,3	4,0	4,3	3,87	—
600...	5,3	5,8	5,2	6,2	5,62	56
700...	7,1	7,3	7,2	7,2	7,20	62
800...	8,5	9,0	8,4	8,8	8,67	67
900...	10,3	10,6	10,3	10,6	10,45	52
1000...	11,8	12,6	11,9	12,3	12,15	58
1100...	13,7	14,3	13,7	13,1	13,70	63
1200...	15,9	16,2	15,2	15,8	15,77	48
1300...	18,4	18,7	18,2	17,5	18,20	41
1400...	20,2	20,5	19,8	20,3	20,20	48
1500...	21,9	21,7	20,9	21,8	21,57	72
1600...	23,7	23,7	23,4	23,7	23,62	48
1700...	25,6	25,5	25,4	25,3	25,45	54
1800...	26,9	27,1	27,0	27,1	27,02	62
2000...	30,7	30,8	30,4	31,5	30,85	69
2100...	32,3	32,4	32,1	32,2	32,25	70
2200...	34,1	34,3	33,8	33,7	33,97	57
2300...	35,8	35,7	35,5	35,3	35,57	62
2400...	37,6	37,4	37,5	37,3	37,45	52
2500...	39,3	39,0	39,2	39,0	39,12	58
					Moyenne générale.....	$57,8 \times 10^4$

Longueur à vide 7,00
Longueur sous charge de 2500. 10,75

santes. Les moyennes figurent dans la colonne 6. Enfin, dans la colonne 7, on trouvera les valeurs du coefficient d'élasticité λ du ressort (rapport de la variation de la charge à la variation de l'allongement) exprimées en CGS. Au degré de précision des expériences, on peut le considérer comme suffisamment constant entre 500 et 2500 grammes. Au-dessous de 500 grammes la variation des allongements n'est pas linéaire, les spires étant serrées à vide, et les ressorts subissant de ce fait une certaine compression initiale. Les ressorts proviennent tous deux de la même fabrication et ont les mêmes caractéristiques (21 spires, diamètre du boudin : 25 mm., diamètre du fil : 2 mm.). Pour l'un, $\lambda = 57{,}7 \times 10^4$ CGS, et pour l'autre, $\lambda = 57{,}8 \times 10^4$. Pratiquement, on peut donc les considérer comme identiques.

Toute cette série de mesures a été effectuée par des températures oscillant entre 4°,8 et 5°,0; par suite, il n'y avait pas à craindre de perturbations importantes du fait de la température.

2° *Étude du coefficient d'élasticité du système quand on fait varier la tension des ressorts auxiliaires.* — *a*) Le coefficient d'élasticité β de l'appareil peut être mesuré de plusieurs façons. J'ai d'abord utilisé un procédé statique.

A l'aide d'une lunette, on peut viser un index fixé à la tige de poussée qui part du centre de gravité de la masse; une échelle micrométrique permet de mesurer le déplacement de celle-ci au 1/100 mm.; de plus, l'index mobile comporte un vernier au 1/10.

Dans une première série de mesures, j'ai enlevé les ressorts auxiliaires, après quoi je les ai remis en place et leur ai donné des tensions de plus en plus fortes, jusqu'à atteindre celles qui sont mises en jeu lors du fonctionnement normal de l'appareil. Pour chaque série d'expérience, j'ai noté la période correspondante. Un plateau fixé à la tige de poussée permet de placer de petites masses additionnelles. Mesurant l'allongement pour une masse additionnelle donnée, on en déduit le coefficient d'élasticité du système. J'ai opéré avec des masses alternative-

ment croissantes et décroissantes pour éliminer l'effet d'hystérésis. Pour les courtes périodes, je les ai fait varier de 10 gr. en 10 gr.; à partir de 1ˢ,7 de 5 gr. en 5 gr. La charge initiale a été choisie dans chaque série d'expérience de façon à réaliser une déviation suffisamment grande pour que la mesure soit possible, et la charge finale de façon à produire des déviations ne dépassant pas trop celles que l'on obtient lors des oscillations de l'appareil au cours d'un séisme. La plus petite charge utilisée dans toutes les expériences a été 5 gr., la plus grande 500 gr.

La température a été notée chaque fois : 1° au début, 2° après avoir atteint la plus forte charge, 3° après retour à la charge initiale, et ainsi de suite. Il se produit une hausse de température d'environ 1/2 degré au cours d'une demi-journée d'expérience ; cette variation est due à la présence de l'observateur, et au rayonnement des lampes électriques. Elle n'aurait pu être éliminée sans des complications hors de proportion avec le résultat cherché. Dans l'ensemble, la température est restée comprise entre 5°,0 et 6°,5 pendant toute la série des mesures, écart suffisamment faible.

Au degré de précision des expériences, on peut admettre que la valeur du coefficient d'élasticité du système est sensiblement constante pour une période donnée. Le tableau II rassemble les résultats obtenus dans la première série d'expériences (période : 1ˢ,0). La première colonne indique les charges en grammes. Les allongements, exprimés en 1/100 mm., se trouvent dans les colonnes suivantes (M : charges croissantes ; D : charges décroissantes). L'avant-dernière colonne renferme les moyennes, et la dernière, les valeurs calculées pour β, coefficient d'élasticité de l'appareil, en CGS. Des tableaux analogues ont été établis pour les diverses périodes : faute de pouvoir les reproduire en totalité, je résume les résultats dans le tableau IV. Dans la première colonne de ce tableau figurent les périodes mesurées T_0 et dans la colonne 2 les quantités β_1 obtenues par les mesures que je viens d'exposer.

b) On peut également calculer de nouvelles valeurs β_2 par

Tableau II

Etude du coefficient d'élasticité du Vertical Wiechert.

Ressorts auxiliaires ôtés. $T = 1^s,0$ $\theta = 5°,0$ à $5°,4$

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MOYENNE	β
	$5^0,0$	$5^0,1$	$5^0,1$	$5^0,3$	$5^0,2$	$5^0,3$	$5^0,3$	$5^0,4$	$5^0,2$	$5^0,4$		
	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D		$\times 10^5$
30 ...	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,3	0,3	0,5	0,4	0,5	0,44	669
40 ...	0,6	0,7	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,7	0,61	643
50 ...	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,6	0,7	0,9	0,8	0,8	0,78	630
60 ...	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,91	648
70 ...	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1	1,0	1,0	1,01	680
80 ...	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,0	1,1	1,3	1,1	1,1	1,12	700
90 ...	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3	1,2	1,2	1,4	1,2	1,3	1,26	700
100 ...	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4	1,3	1,5	1,3	1,5	1,39	700
110 ...	1,5	1,5	1,6	1,5	1,6	1,5	1,5	1,7	1,5	1,7	1,54	700
120 ...	1,7	1,7	1,8	1,7	1,8	1,7	1,8	1,8	1,7	1,8	1,75	675
130 ..	1,9	1,8	1,9	1,8	1,9	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,87	675
140 ...	2,0	1,9	2,0	1,9	2,0	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	1,97	695
150 ...	2,1	2,0	2,1	2,0	2,1	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,07	710
200 ...	3,0	2,9	3,0	3,0	2,9	3,0	2,9	3,9	3,0	3,0	2,97	660
500 ...	7,0	7,0	7,0									
	$5^0,1$	$5^0,1$	$5^0,2$	$5^0,2$	$5^0,3$	$5^0,3$	$5^0,4$	$5^0,4$	$5^0,3$	$5^0,3$		$\times 10^5$

Moyenne générale $\beta = 660 \times 10^5$

une méthode dynamique, en utilisant les périodes mesurées : il suffit pour cela d'utiliser la relation $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\beta}}$. Les nouvelles valeurs ainsi obtenues figurent également dans le tableau IV (colonne 4).

3° *Allongements des ressorts auxiliaires correspondant aux diverses périodes.* — Les ressorts auxiliaires étant mis en place, je les ai desserrés complètement, puis j'ai mesuré leurs allongements correspondant à des périodes croissantes. D'après les mesures précédentes, j'en ai déduit la valeur de leur tension f. Cette tension croît rapidement d'abord, puis plus lentement ensuite. Elle est égale à 4 kgs. 2 pour une période de 4",0. Les résultats figurent dans le tableau III.

Partant de la formule (32) en posant $\beta_3 = A - kf$, on peut calculer une troisième série de valeurs β_3 du coefficient d'élasticité de l'appareil[1] (voir tableau IV, colonne 5).

4° *Discussion des résultats.* — Les trois séries de valeurs obtenues pour le coefficient β sont très différentes les unes des autres. Les valeurs β_1, obtenues par la méthode statique, sont beaucoup plus élevées que les valeurs β_2, obtenues par la méthode dynamique : elles correspondent à des périodes T_1 plus faibles que celles T_0 que l'on observe réellement (dans le tableau IV, colonne 3, figurent les périodes T_1 calculées d'après la formule $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\beta_1}}$). Les séismographes étant destinés à l'étude, non des déplacements permanents, mais des oscillations, ce sont les valeurs β_2 qui doivent servir de base de comparaison. L'écart entre les deux séries de valeurs doit être attribué à l'effet des organes de transmission et d'amplification qui, comme je l'ai dit plus haut, constituent de véritables pendules supplémentaires.

1. Pour chaque période, j'ai mesuré la quantité D (voir pp. 46 et 49) qui varie suivant la tension du ressort, et qui entre dans l'expression du coefficient k.

Tableau III

Allongements des ressorts auxiliaires pour les diverses périodes
$\theta = 5^0$.

Tension limite : 4 kgs. 45. Allongement limite : 36 mm.

PÉRIODE S.	RESSORT SUPÉRIEUR		RESSORT INFÉRIEUR		TENSION TOTALE KGS.
	LONGUEUR CM.	ALLONGEMENT MM.	LONGUEUR CM.	ALLONGEMENT MM.	
1	6,78	0	7,00	0	0
1,5	8,95	21,7	9,15	21,5	3,0
1,7	9,05	22,7	9,40	24,0	3,2
2,0	9,35	25,7	9,60	26,0	3,4
2,3	9,60	28,2	9,80	28,0	3,8
2,5	9,70	29,2	9,90	29,0	3,9
2,8	9,80	30,2	10,00	30,0	4,0
3,4	9,90	31,2	10,10	31,0	4,1
3,7	9,95	31,7	10,15	31,5	4,15
4,0	10,00	32,2	10,20	32,0	4,2

Tableau IV

Étude du coefficient d'élasticité du Vertical Wiechert de 1200 kgs.

T_0 S.	MÉTHODE STATIQUE		MÉTHODE DYNAMIQUE	$\Lambda - kf$		ÉCARTS	
	β_1 $\times 10^5$	T_1 S.	β_2 $\times 10^5$	β_3 $\times 10^5$	T_3 S.	$\beta_1 - \beta_2$ $\times 10^5$	$\beta_2 - \beta_3$ $\times 10^5$
1,0	660	0,84	»	»	»	»	»
1,5	285	1,29	211	225	1,45	74	14
1,7	247	1,38	164	196	1,55	83	32
2,0	175	1,64	119	164	1,69	56	45
2,3	123	1,96	89	105	2,12	44	16
2,8	96	2,22	60	68	2,64	36	8
3,4	59	2,84	41	54	2,96	18	13

Les valeurs β_3, tirées de la formule $\beta_3 = \Lambda - kf$ (colonne (5) sont comprises entre les valeurs β_4 et les valeurs β_2, mais sont plus rapprochées de ces dernières que des valeurs β_1. Les écarts $\beta_3 - \beta_2$ (colonne 8) représentent l'effet des organes de transmission dont la formule (32) ne tient pas compte. Les valeurs β_3 correspondent à des périodes plus petites que celles que l'on observe réellement (dans le tableau IV, colonne 6, figurent les valeurs T_3 calculées d'après la formule $T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\beta_3}}$). Les organes de transmission ont donc pour effet de contribuer à augmenter la période : pour atteindre une période déterminée, la tension à donner aux ressorts auxiliaires est moins forte que celle que ferait prévoir la formule (32).

Les écarts $\beta_3 - \beta_2$ varient irrégulièrement avec la période : ils sont spécialement importants pour les périodes $1^s,7$ et $2^s,0$. Comme on a affaire à une série de pendules couplés, peut-être pourrait-on attribuer la cause de ce fait à des phénomènes de résonance.

5° *Charge limite.* — Dans la formule (32)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\Lambda - kf}},$$

on voit que pour $\Lambda = kf$, $T = \infty$. La valeur limite F de la tension des ressorts est donc $\frac{\Lambda}{k}$. Bien avant que cette valeur soit atteinte, l'appareil se montre instable. Pour le Wiechert, F = 4 kgs, 45. Il y a là un renseignement utile pour le choix des ressorts auxiliaires ; on peut d'après cela fixer facilement un coefficient de sécurité convenable. Il faut d'autre part prévoir une valeur de λ assez petite pour permettre de fins réglages (allongements relativement grands pour de faibles variations de la tension).

On a établi des abaques qui représentent graphiquement les relations entre l'allongement, le diamètre du fil, le diamètre du boudin, la charge pratique à ne pas dépasser pour une valeur

qu'on se fixe de la fatigue du métal[1]. Dès lors, le choix des ressorts auxiliaires n'est plus qu'une question de technique courante.

III. *Le grand pendule de Strasbourg.*

Pour des raisons de stabilité, les dispositifs d'augmentation de période comportent toujours deux ressorts, mais ceux-ci peuvent être placés de façons différentes. J'ai décrit plus haut la construction de Wiechert[2]. Sur l'appareil de Zurich, les ressorts sont placés de part et d'autre de la masse, et chacun d'eux agit isolément sur un système de tiges et de leviers, les deux parties de la construction étant symétriques et à 90° de la plume d'inscription. Peut-être réalise-t-on ainsi une symétrie plus rigoureuse et une plus grande stabilité, mais au point de vue pratique, il y a un inconvénient sérieux, c'est que le moindre réglage nécessite la présence de trois opérateurs : un pour chacun des ressorts et un pour la plume[3].

A Strasbourg, on a donc renoncé à cette solution pour en adopter une qui rappelle celle de Wiechert. Les deux ressorts agissent sur le même levier; mais ici, au lieu de construire de nouveaux organes, on a réalisé une construction très simple en faisant agir les ressorts auxiliaires sur le deuxième levier de transmission de la composante verticale.

Pour éviter les ruptures que pourraient occasionner les chocs trop grands provenant de séismes voisins, les tiges de liaison secondaires sont munies chacune d'un ressort d'amortissement[4]. Ce dispositif est sans doute très utile en certains observatoires; son intérêt est limité à Strasbourg, où les secousses d'origine rapprochée ne sont jamais très violentes. Pour pouvoir installer la construction que je vais décrire, j'ai dû rendre rigide la tige de liaison secondaire de la composante verticale.

1. Voir par exemple : C. Reynal, *Les Ressorts* (Dunod, Paris, 1927).
2. Voir p. 45.
3. M. Kreis, Directeur de l'Observatoire de Coire, a adopté pour son appareil un nouveau dispositif qui n'a encore fait l'objet d'aucune publication.
4. Voir **32**, p. 56.

Jusqu'à présent, cette transformation n'a entraîné aucun inconvénient; il semble peu probable qu'elle en fasse apparaître ultérieurement.

Le deuxième levier, en forme d'équerre, permet d'appliquer le principe général : introduction d'une force réglable disposée de telle sorte que lorsqu'on écarte l'appareil de sa position de zéro le bras de levier augmente, et que le couple tende à écarter le système de sa position initiale. Il faut utiliser deux ressorts : l'un d'entre eux est placé à la partie inférieure, l'une de ses extrémités étant fixée au socle de ciment armé, l'autre commandant le contre-poids du deuxième levier par l'intermédiaire de deux pièces de laiton et de deux câbles d'acier. Le deuxième ressort est fixé par son extrémité supérieure à l'une des poutrelles du bâti, et exerce sa traction par un dispositif analogue sur l'extrémité inférieure du deuxième levier (voir *fig.* 27 et 28). Les lettres ont le même sens que dans les schémas précédents : on a affecté de l'indice 1 les organes se rapportant au ressort supérieur R_1 et de l'indice 2, ceux qui se rapportent au ressort inférieur R_2. X_1 Y_1, X_2 Y_2, X'_1 Y'_1, X'_2 Y'_2 sont les pièces de laiton reliées par le câble transmettant la traction des ressorts.

1° *Caractéristiques des ressorts.*

Après divers essais préliminaires, j'ai finalement porté mon choix sur deux ressorts dont les caractéristiques sont les suivantes :

	Ressort supérieur	Ressort inférieur
Diamètre du fil.....	2 mm. 5	2 mm. 5
Diamètre du boudin.....	23 mm. 5	25 mm. 0
Nombre de spires.....	38	31
Longueur à vide.....	12 cm. 80	12 cm. 45

Leurs coefficients d'élasticité ont été mesurés à 10° pour des charges variant entre 2 kgs. et 3 kgs. 5 (on verra plus loin que cette dernière charge n'est pas dépassée). Ces ressorts étant à spires serrées, les allongements ne commencent à croître

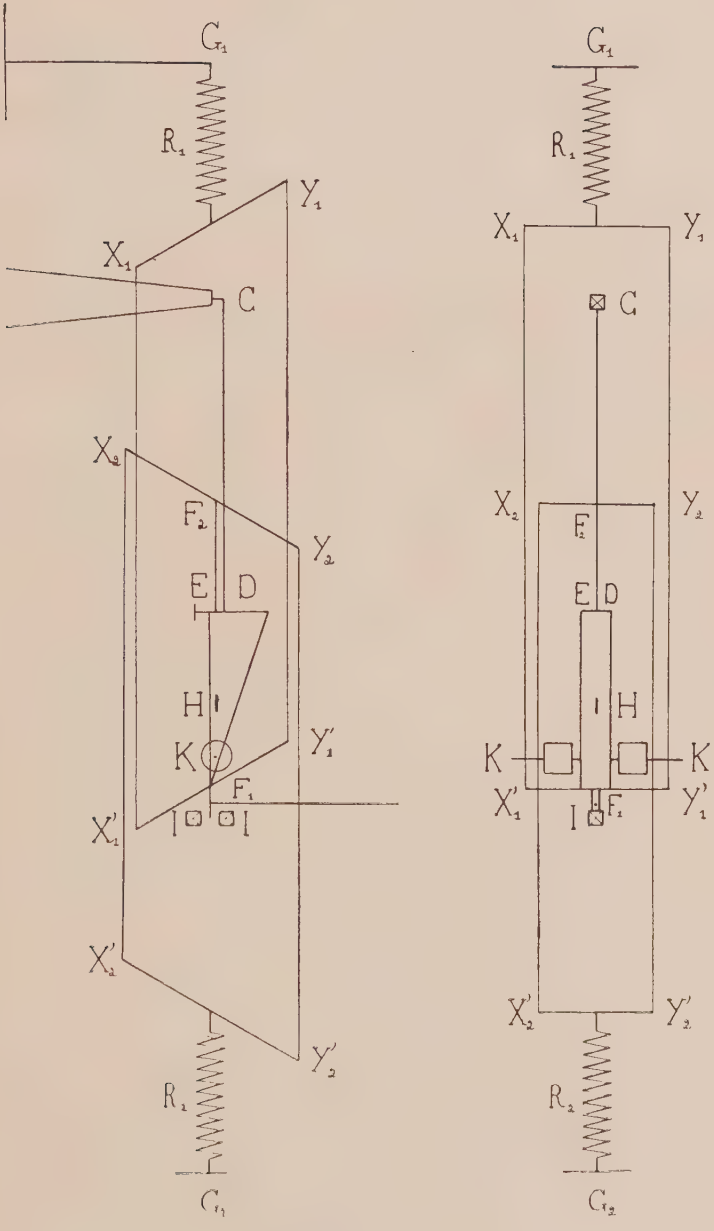


Fig. 27.

linéairement que vers 2 kgs. L'allongement moyen pour 1 kg. est de 0 cm. 94 pour le ressort supérieur et de 0 cm. 92 pour le ressort inférieur. D'où, en CGS, les valeurs des coefficients d'élasticité $\lambda_1 = 1040 \times 10^3$ et $\lambda_2 = 1069 \times 10^3$.

Je rappelle que le coefficient de la tension dans la formule (32) est $k = \frac{b^2}{a^2c^2} \cdot \frac{Dd}{D+d}$. Ici $\frac{b}{a} = 10$, $c = 1$ cm. d et D n'ont pas la même valeur pour les deux ressorts :

Ressort R_1.....	$d_1 = 15$ cm.	$D_1 = 49$ cm. 5
— R_2.....	$d_2 = 9$ cm.	$D_2 = 76$ cm. 0

les valeurs de D ont été mesurées, les ressorts étant détendus. On en déduit $k_1 = 1151$ et $k_2 = 805$.

Afin de prévoir une limite supérieure de la tension qu'auront à supporter les ressorts, j'ai pris une valeur intermédiaire $k = 1000$. D'où $F = \frac{\Lambda}{k} = 18$ kgs. 8.

La charge pratique à admettre pour chacun des deux ressorts étant de 10 kgs. (fatigue admise 30 kgs. par mm²), leur choix est ainsi justifié : ils n'auront pas à dépasser leur limite d'élasticité.

2° *Marche des expériences.*

Une fois les pièces mises en place, en tendant les ressorts, j'ai pu rapidement porter la période de 0ˢ,2 à 0ˢ,4, mais au delà l'appareil devient instable; le deuxième levier se cale contre le bâti, soit latéralement, soit en avant, soit en arrière. On a vu plus haut que le dispositif n'était pas complètement symétrique; par suite, la tension des ressorts n'est pas répartie uniformément comme elle devrait l'être, et les 4 fils ne sont pas également tendus. On peut réduire les effets fâcheux de cette dissymétrie en réglant la longueur des fils, et en tendant l'un des deux ressorts plus que l'autre, mais pour obtenir un résultat satisfaisant il est nécessaire d'utiliser des masses additionnelles.

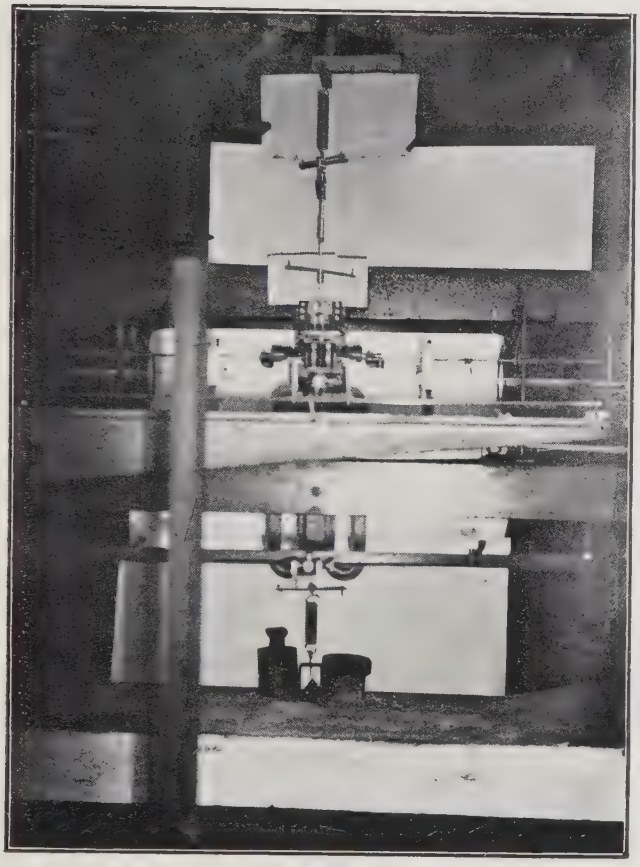


Fig. 28.

3° *Emploi de masses additionnelles.*

Sur le vertical Wiechert, le dispositif d'augmentation de période comporte des masses additionnelles (poids total 1085 gr.) dont le centre de gravité est situé à la hauteur de l'axe de rotation et à 2 cm. en avant de ce dernier. Elles peuvent coulisser sur leur support, ce qui permet, soit en déplaçant l'une, soit en déplaçant l'autre, de compenser l'excès de tension qui peut se produire sur un côté. Il est ainsi plus facile d'assurer la stabilité du système.

J'ai adapté un dispositif analogue sur le grand pendule. Sur une tige placée en K, en avant de l'axe de rotation du deuxième levier, j'ai fixé les masses additionnelles et étudié leurs effets. Je reviendrai plus loin sur cette question; j'indique seulement que le total des masses employées a atteint un maximum de 2370 gr., j'ai pu de la sorte atteindre une période de $1^s,0$ [1].

Le fait d'installer de telles masses pourrait à première vue paraître dangereux pour les lamelles d'acier qui constituent l'axe du deuxième levier. En fait, elles ne courent aucun risque, le déplacement du levier étant limité par les butoirs H dans le sens latéral et Ï dans le sens antéro-postérieur. Effectivement, il ne s'est jamais produit le moindre accident, malgré les nombreuses opérations de réglage que le dispositif a dû subir.

4° *Effets des liaisons élastiques.*

D'une part, les leviers oscillent autour d'axes constitués par des lamelles flexibles en acier; d'autre part, les tiges de liaison primaire et secondaire comportent des parties amincies, afin de permettre le jeu nécessaire aux pièces. En particulier, la tige secondaire possède à sa partie inférieure un fil d'acier, de section circulaire, d'un diamètre égal à 0 mm. 4. Par suite de la mise en marche et du réglage du dispositif d'augmentation

1. Dans certaines expériences, j'ai même pu parvenir à une période de $1^s,8$; mais dans ces conditions, l'appareil était instable.

de période, ce fil a dû supporter des charges très supérieures à celles pour lesquelles il avait été calculé : d'où plusieurs accidents. Il s'est dessoudé plusieurs fois (extension trop forte) et a fini par se briser (compression et flexion exagérées).

Ces accidents m'ont procuré l'occasion de comparer les résultats obtenus avec des fils de différents diamètres[1]. J'ai utilisé un fil de 0 mm. 3, un fil de 0 mm. 6, et un autre fil de 0 mm. 4 à titre de vérification. Les résultats obtenus ont été les suivants :

1° Des fils de même diamètre ont donné les mêmes résultats, par suite, aucune perturbation n'a été introduite dans le fonctionnement du système.

2° Le fil de 0 mm. 3, beaucoup trop faible, se déformait : d'où de brusques variations du zéro de l'appareil. Il permettait en outre un jeu exagéré de la deuxième tige de liaison : parfois, on pouvait discerner à l'œil nu les vibrations de cette pièce. Le mouvement du sol était donc assez infidèlement transmis à la plume d'inscription.

3° Les fils de 0 mm. 4 travaillaient au voisinage de la limite des déformations élastiques.

4° Le fil de 0 mm. 6 a donné les meilleurs résultats. Des fils plus gros, ne permettant pas un jeu suffisant, auraient gêné le fonctionnement de l'appareil.

5° Plus le fil est gros, plus forte est la tension à donner aux ressorts auxiliaires pour obtenir une période déterminée. Pour atteindre une période de 1",0, il a fallu donner à chaque ressort un allongement de 3 mm. de plus avec le fil de 0 mm. 6 qu'avec le fil de 0 mm. 3, ce qui correspond à une différence totale de tension égale à 600 gr. On voit donc l'importance de ce fil de liaison. Les autres fils et les lamelles jouant un rôle analogue, on conclura qu'il n'est pas possible d'assigner à chacun des éléments son influence exacte dans les résultats obtenus.

1. Au cours d'expériences faites sur un appareil de démonstration du dispositif d'augmentation de période, M. Rothé avait déjà constaté que le choix des liaisons élastiques influait beaucoup sur les résultats obtenus.

5° *Tensions observées.*

La longueur des ressorts auxiliaires a été mesurée, à la période de 1ˢ,0, avec les fils de 0 mm. 3 et 0 mm. 6. De l'étude faite auparavant du coefficient d'élasticité de ces ressorts, on déduit que la tension totale est de 6 kgs. 3 dans le premier cas et de 6 kgs. 9 dans le dernier.

Cherchons la tension correspondante à la période 1ˢ,0, d'après la formule (32) $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{A - kf}}$. (Je rappelle que $M = 19{,}3$ tonnes, $A = 1850 \times 10^7$ et $k = 1000$.) D'où $f = 17$ kgs. 8.

L'écart avec les valeurs observées ne saurait être attribué entièrement à l'effet des liaisons élastiques. Il doit tenir, en grande partie, au rôle des masses additionnelles. En effet, dans le Wiechert, leur centre de gravité est placé à une petite distance (2 cm.) de l'axe de rotation du balancier; de plus, étant données les dimensions de cette pièce (40 cm. de longueur), son moment d'inertie n'est augmenté que faiblement du fait de l'addition de masses. Dans le grand pendule, au contraire, le centre de gravité des masses est situé à 10 cm. de l'axe de rotation, et le deuxième levier n'a que 25 cm. de long : d'où une augmentation notable de son moment d'inertie. J'ai pu constater, les ressorts auxiliaires étant détendus, que l'installation des masses suffisait pour porter la période de l'ensemble du séismographe de 0ˢ,2 à 0ˢ,4. Il semble qu'il faille voir là l'explication de l'important écart observé plus haut.

6° *Constantes obtenues.*

La *période* a donc pu être portée à 1ˢ,0. Mais trois autres éléments sont encore à envisager : la *stabilité*, l'*agrandissement* et le *frottement*. Ces quatre éléments sont étroitement liés : il est malaisé d'améliorer l'un d'entre eux sans modifier les autres; d'où la difficulté des réglages[1].

1. Je laisse de côté l'amortissement, dont le rôle est le même dans tous les séismographes, qu'ils soient horizontaux ou verticaux.

a) *Stabilité.* — Le levier du dispositif d'augmentation de période est en équilibre sous l'action de plusieurs forces : poids de la masse principale et des masses additionnelles, tension des ressorts principaux et des ressorts auxiliaires, qui par l'intermédiaire des différents bras de levier s'appliquent en des points différents. Les liaisons élastiques interviennent également. Il faut qu'après un choc l'appareil reprenne exactement sa position de zéro; le deuxième levier doit donc être amené à l'état d'équilibre stable. Par suite de sa forme complexe, et des nombreuses forces et réactions mises en jeu, on ne peut songer à obtenir ce résultat par le calcul. Force est donc d'opérer empiriquement.

J'ai cherché à obtenir l'équilibre par addition de masses en différents points du levier, soit successivement, soit simultanément (à la partie inférieure, à la partie supérieure, en avant, en arrière, et latéralement). J'ai comparé les résultats obtenus, et chaque fois j'ai mesuré les valeurs correspondantes de l'agrandissement et du frottement. Dans certaines expériences, j'ai fait varier la période; dans d'autres, je l'ai maintenue à 1^{s},0.

Le fil de liaison, dont il a été question plus haut, a aussi une grande influence. Les observations faites avec les fils de 0 mm. 3, 0 mm. 4 et 0 mm. 6 ont montré que plus le diamètre du fil est gros, plus on parvient aisément à réaliser l'équilibre stable. Avec le fil de 0 mm. 6, l'équilibrage du deuxième levier au moyen de petites masses placées en différents points de ce dernier perd beaucoup de son importance. Aussi, après une longue série de mesures, j'ai finalement conservé le fil de 0 mm. 6 et j'ai utilisé exclusivement les masses latérales dont il a été question plus haut (2370 gr.). Le levier semble ainsi convenablement équilibré.

Une cause d'instabilité de l'appareil tient à la petitesse du bras de levier c (1 cm.) par lequel s'exerce la traction des ressorts auxiliaires, On obtient plus facilement l'équilibre stable en augmentant la longueur de ses bras. Mais alors on réduit l'agrandissement, et, de plus, on ne peut atteindre que des périodes nettement plus petites. Les résultats sont les suivants :

Bras de levier...	c mm.	25	21	17	11,5	10
Agrandissement statique.....	V_0	600	700	900	1300	1500
Période maximum obtenue	T s.	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0

Il n'est pas possible d'obtenir une période de 1s,0 sans réduire la valeur de c au minimum. Ce résultat était d'ailleurs à prévoir, car le coefficient k de la tension dans la formule (32) est inversement proportionnel à c^2 $\left(k = \frac{b^2}{a^2 c^2} \cdot \frac{Dd}{D+d}\right)$.

b) *Agrandissement statique.* — On sait que l'agrandissement statique d'un séismographe est la limite du rapport entre les amplitudes mesurées sur les inscriptions et les déplacements correspondants effectués en réalité par le sol, quand la période des oscillations tend vers zéro. Cette valeur s'obtient d'une façon très simple pour la composante verticale du grand pendule; il suffit de déposer sur la tête de la tige primaire verticale partant du centre de gravité une masse additonnelle m. On observe sur la feuille une déviation a. M étant la masse principale, L la longueur du pendule simple synchrone définie par $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, T étant la période de l'appareil, l'agrandissement statique V_0 est donné par la formule $V_0 = \frac{Ma}{mL}$.

Des mesures faites sur le Wiechert en l'absence de ressorts auxiliaires ont donné pour l'agrandissement statique une valeur de 280. Dès que l'on tend les ressorts, les valeurs trouvées pour V_0 deviennent brusquement plus faibles. Si l'on fait croître la tension des ressorts, la valeur de V_0 reste sensiblement constante, elle est comprise entre 180 et 200 pour des périodes allant de 1s,4 à 4s,2 (des écarts du même ordre s'observent d'un mois à l'autre, lors de la prise régulière des constantes, que la période ait varié ou non).

Le phénomène est encore plus marqué pour le grand pendule. Sans ressorts auxiliaires, l'agrandissement a pu atteindre

une valeur égale à 4570; une fois les ressorts tendus, il devient beaucoup plus petit.

Le tableau V indique un exemple des mesures faites avec des masses additionnelles constantes, alors qu'on fait varier la tension des ressorts auxiliaires; a est la déviation obtenue sur la feuille pour une surcharge de 1 kg. au centre de gravité, et V_0 l'agrandissement statique obtenu.

La position des masses additionnelles du dispositif d'augmentation de période influe sur l'agrandissement, et le fait d'augmenter les masses diminue l'agrandissement.

Le tableau VI donne les résultats d'expériences faites pour une période de 1^s,0 avec un fil de 0 mm. 4 et un fil de 0 mm. 6 en faisant varier le poids des masses latérales additionnelles, en ajoutant ou en retranchant de petites surcharges à l'arrière du levier, et en déplaçant les rondelles de plomb servant de contrepoids au levier.

L'agrandissement varie aussi avec le diamètre du fil de liaison. Ci-dessous les résultats obtenus avec les différents fils pour une période de 1^s,0 et un frottement égal à 0,9, toutes choses égales d'ailleurs.

	Fil de 0 mm. 3	1er fil de 0 mm. 4	2^e fil de 0 mm. 4	Fil de 0 mm. 6
V_0	650	1170	1150	1400.

Ces variations s'expliquent aisément, si l'on considère qu'une partie de l'énergie transmise est absorbée par les ressorts auxiliaires, par les liaisons, et qu'une autre partie sert à vaincre l'inertie des masses additionnelles.

Par des réglages convenables, l'agrandissement peut être porté à une valeur égale à 1500; mais pour que l'équilibre du levier soit bien assuré et que le frottement ne soit pas excessif, il est préférable de s'arrêter à une valeur d'environ 1200.

c) *Frottement.* — Le frottement de la plume sur le papier enduit de noir de fumée est aussi un élément utile à connaître. Si on supprime l'amortissement en enlevant les aimants amortisseurs, et si on donne un choc à la masse, celle-ci se met

à osciller ; les oscillations dureraient indéfiniment s'il n'y avait pas de frottement. Mais, par suite du frottement, leur amplitude diminue assez rapidement. On admet que tout se passe comme si, après chaque demi-amplitude, l'axe autour duquel se font les oscillations était déplacé d'une quantité r qui définit le frottement. Après la demi-amplitude suivante, l'axe sera déplacé d'une quantité encore égale à r, mais en sens contraire. Entre les deux demi-amplitudes, il y aura donc une différence égale à $2r$. Pour ne pas avoir à déterminer la position de l'axe, on opère de la façon suivante. On repère sur l'inscription 4 sommets consécutifs, 1, 2, 3, 4, comptés dans le sens où les vibrations s'amortissent. De l'amplitude complète séparant les sommets 1 et 2 on retranche l'amplitude complète séparant les sommets 3 et 4 : on voit facilement que la quantité ainsi obtenue est égale à $8r$. On répète la mesure pour plusieurs oscillations, et on en déduit une valeur moyenne pour r. Par cette mesure, on peut vérifier si l'appareil est en bon état ; les réglages doivent tendre à rendre r le plus petit possible.

Des mesures faites sur le Wiechert montrent que, à partir d'une certaine valeur, le frottement croît plus vite que le carré de la période :

T	1,45	1,65	2,4	3,6	4,2
r	0,06	0,09	0,12	0,49	0,75
$\frac{r}{T^2}$	0,029	0,034	0,028	0,038	0,042

Les mesures effectuées sur le grand pendule conduisent à des résultats analogues (Tableau V). L'addition de masses au levier du dispositif d'augmentation de période tend à réduire le frottement, mais d'une façon irrégulière, la position des masses intervenant aussi (Tableau VI).

d) *Agrandissement dynamique.* — L'agrandissement dynamique V est le rapport entre l'amplitude mesurée sur le séismogramme et le mouvement réel du sol ; on sait qu'il est fonc-

Tableau V

Valeurs de l'agrandissement et du frottement pour des périodes croissantes et décroissantes.

T s.	r mm.	$\frac{r}{T^2}$	a mm.	V_0
Fil de 0 mm. 3. Masses latérales 1850 grammes. Petite surcharge en arrière.				
0,55	0,16	0,53	3,5	930
0,6	0,27	0,75	4	890
0,7	0,31	0,63	5	815
0,8	0,43	0,67	7	880
0,9	0,99	1,22	9	890
1,0	1,21	1,21	10	800
0,8	0,52	0,81	6	750
0,7	0,45	0,92	5	815
0,6	0,22	0,61	4	890
0,55	0,21	0,70	3,5	935
0,5	0,12	0,48	3	960
Fil de 0 mm. 6. Masses latérales 2370 grammes.				
0,55	0,12	0,40	4	1070
0,6	0,17	0,47	4,5	1000
0,7	0,22	0,45	6	980
0,75	0,37	0,66	6,5	930
0,8	0,45	0,70	7,5	1055
0,85	0,70	0,97	8,5	940
0,9	0,80	0,99	10	990
1,0	0,82	0,82	12	960
1,05	1,07	0,97	14	1020

Tableau VI

Valeurs de l'agrandissement et du frottement pour une période égale à 1ˢ,0.

r mm.	a mm.	V_0	OBSERVATIONS
			Fil de 0 mm. 4. Masses additionnelles variables.
1,21	13,0	1040	Masses latérales : 660 gr.
1,03	14,0	1120	Petites surcharges arrière progressivement croissantes.
0,89	12,5	1000	
1,00	13,0	1040	
0,72	9,5	760	Masses latérales : 820 gr.
0,94	10,0	800	Petites surcharges arrière progressivement croissantes.
0,95	12,0	960	
0,84	8,0	620	
0,84	11,0	880	Surcharges arrière progressivement décroissantes.
0,71	10,0	800	
0,62	9,0	720	
0,55	7,5	600	Masses latérales 1190 gr. Suppression des surcharges arrière.
			Fil de 0 mm. 6. Variations de la valeur et de la position des masses additionnelles.
1,75	24	1920	Masses latérales : 1430 gr.
2,12	23	1840	— 1570
1,91	24	1920	— 1690
1,60	21	1680	— 1710
1,02	18	1440	— 1850
1,08	19	1520	— 1850
1,08	17	1360	— 2010
1,50	20	1600	— 2170
1,14	23	1840	On a descendu légèrement les rondelles du contrepoids.
1,69	20	1600	Les rondelles du contrepoids sont au milieu.
1,14	19	1520	Les rondelles du contrepoids sont en bas.
1,34	22	1760	Les rondelles sont remises en haut.

tion de la période de ce mouvement. Pour les appareils à inscription mécanique, il est donné par la formule :

$$V = \frac{V_0}{(1+u^2)\sqrt{1-[\mu]\left(\frac{2u}{1+u^2}\right)^2}} \qquad (35)$$

où V représente l'agrandissement statique, u le rapport de la période du mouvement du sol à la période de l'instrument, et $[\mu]$ la constante d'amortissement[1] :

$$[\mu] = \frac{1}{1+0{,}5372\log v} \qquad (36)$$

v étant le rapport d'amortissement (rapport de 2 demi-amplitudes consécutives). Pour l'appareil Galitzine, on a :

$$V = \frac{T}{C_1(1+u_1^2)(1+u^2)\sqrt{1-[\mu]\left(\frac{2u}{1+u^2}\right)^2}}. \qquad (37)$$

Dans cette expression, en plus des termes précédemment définis figurent : C_1 constante de l'appareil, et u_1 rapport entre la période T du mouvement du sol et celle T_1 du galvanomètre.

Pour savoir quels services peut rendre un séismographe donné, il est indispensable d'étudier d'abord la variation de son agrandissement dynamique en fonction de la période du mouvement du sol. Afin de permettre une comparaison des trois appareils verticaux actuellement en service à la station de Strasbourg, j'ai donc calculé les agrandissements dynamiques des verticaux Wiechert et Galitzine, et du grand pendule, pour des périodes du mouvement du sol comprises entre 0^s,1 et 10^s. L'agrandissement du grand pendule variant très rapidement aux courtes périodes, j'ai fait le calcul pour cet appareil de 1/10 en 1/10^s jusqu'à 2^s : pour les deux autres appareils le calcul

1. Afin d'éviter des confusions avec le module de Coulomb auquel j'ai conservé sa désignation habituelle par la lettre μ ordinaire, je représenterai la constante d'amortissement par $[\mu]$, entre crochets.

de 1/2 en $1/2^s$ suffisait. La variation étant plus faible pour les périodes plus élevées, j'ai pu, ensuite, pour les trois instruments, me borner à calculer les valeurs de seconde en seconde.

J'ai utilisé pour ces calculs une série de constantes mesurées à la même époque ; elles sont les suivantes :

		Galitzine.
Période du pendule.....	T_0	$11^s,0$
— du galvanomètre	T_1	$11^s,5$
Constante d'amortissement.....	$[\mu]$	+ 0,04
	log C_1	$\bar{3},64738$

		Wiechert.	*Grand Pendule.*
Période.....	T_0	$3^s,2$	1^s 0
Rapport d'amortissement.....	V	3,4	2,0
Agrandissement statique.....	V_0	179	1200

On sait que les « constantes » (il vaudrait mieux dire les caractéristiques) d'un séismographe se modifient légèrement avec le temps. Mais si, en utilisant des constantes mesurées à d'autres époques, on doit obtenir des valeurs un peu différentes, l'allure générale des résultats ne sera cependant pas modifiée.

Les résultats figurent dans le tableau VII et sont représentés par les courbes de la fig. 29 (*a*, grand pendule ; *b*, Wiechert, et *c*, Galitzine).

En résumé :

1° Pour $0^s,1$ l'agrandissement dynamique est presque égal à l'agrandissement statique pour les appareils à inscription mécanique. J'ai déjà signalé plus haut que la sensibilité du Galitzine est très faible pour les périodes de cet ordre. Si on fait croître la période, l'agrandissement du Wiechert augmente lentement, celui du Galitzine plus vite, et celui du grand pendule très rapidement.

2° Le maximum de sensibilité pour le grand pendule (2880) est obtenu pour une période de $0^s,9$. A ce moment-là, les agrandissements des deux autres appareils sont tous deux sensiblement égaux à 190.

Tableau VII

Agrandissements dynamiques.

PÉRIODE S.	GRAND PENDULE	WIECHERT	GALITZINE	PÉRIODE S.	GRAND PENDULE	WIECHERT	GALITZINE
0,1	1210	179	22	1,4	1120		
0,2	1260			1,5	850	210	323
0,3	1310			1,6	710		
0,4	1380			1,7	590		
0,5	1560	182	112	1,8	500		
0,6	1740			1,9	430		
0,7	2020			2,0	360	236	417
0,8	2400			3	156	*260*	580
0,9	*2880*			4	85	168	700
1,0	2640	193	210	5	48	98	795
1,1	2400			6	35	63	*830*
1,2	1860			8	19	32	805
1,3	1380			10	12	20	720

3° Si on continue à faire croître la période, l'agrandissement du grand pendule diminue rapidement, celui du Galitzine continuant à augmenter, celui du Wiechert aussi, mais moins vite. Pour 1ˢ,9, le Galitzine et le grand pendule ont le même agrandissement (un peu plus de 400). Pour 2ˢ,4, l'agrandisse-

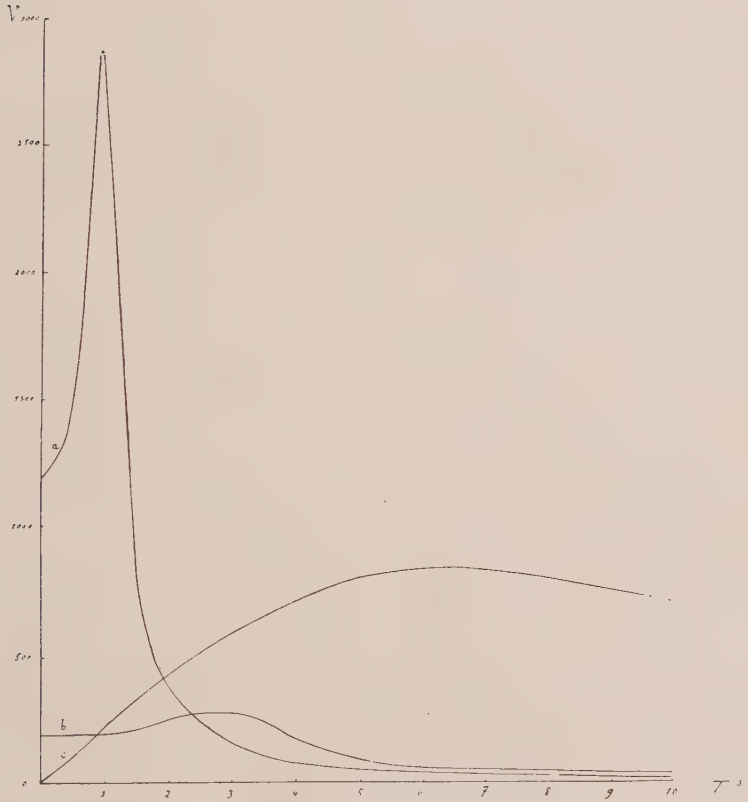


Fig. 29.

ment du Wiechert et celui du grand pendule sont sensiblement égaux à 250 (Galitzine 490).

4° Pour des périodes supérieures, l'agrandissement du grand pendule est inférieur à celui du Wiechert, dont le maximum de sensibilité a lieu pour 3ˢ (Galitzine 580, Wiechert 260, grand

pendule 156). Le maximum de sensibilité du Galitzine a lieu pour 7^{s} (Galitzine 840, Wiechert 50, grand pendule 30).

Le grand pendule est donc supérieur aux autres appareils pour l'inscription des ondes dont la période n'excède pas 0^{s}9.

e) *Comparaison d'inscriptions obtenues à l'aide des trois appareils verticaux.* — 1° *Vibrations artificielles* : Le grand pendule est particulièrement apte à l'inscription des vibrations artificielles dont la période est de l'ordre d'une fraction de seconde (passage de camions, du rouleau à vapeur, etc...). Les ébranlements produits par des explosions ont donné lieu à de nombreuses inscriptions : il s'agissait, en général, de coups de mine dûment identifiés, exécutés dans les environs, soit par le génie militaire, soit par les entreprises qui travaillent à l'aménagement du port de Strasbourg. Parfois, des inscriptions tout à fait semblables n'ont pu être mises en relation avec aucune explosion : peut-être, dans ces cas-là, avait-on affaire à des phénomènes naturels, locaux et d'origine superficielle.

Il ne sera question, dans les exemples ci-dessous, que de la composante verticale qui fait l'objet de ce travail. La figure 30 représente les inscriptions d'une explosion du port de Strasbourg par le grand pendule et le vertical Wiechert, agrandies environ deux fois. On sait que l'appareil Galitzine ne se prête pas à l'inscription de tels phénomènes : l'ébranlement a produit simplement dans ce cas une déviation du point lumineux pendant une dizaine de secondes. La figure 31 représente une autre explosion : celle-ci n'a été enregistrée que par le grand pendule, à l'exclusion des autres appareils.

2° *Séismes naturels* : C'est en vue des tremblements de terre rapprochés que le grand pendule a été construit. Pour montrer les services que l'on peut en attendre, je donne ci-dessous des exemples pris à des distances croissantes.

a) *Séisme du 29 mai 1931, 70 km. Forêt-Noire.*

A de telles distances, les inscriptions sont beaucoup plus importantes sur le grand pendule que sur les autres appareils;

elles sont aussi plus nettes. Dans l'exemple choisi, deux phases se distinguent très bien sur le grand pendule :

$\overline{P}$ 11 h. 51 m. 19 s. $i\overline{S}$ 11 h. 51 m. 28 s.

La deuxième phase seule est nette sur le Wiechert; on ne voit la première sur cet instrument qu'à l'aide d'une loupe. L'inscription Galitzine est insignifiante; et aurait passé inaperçue en l'absence des autres appareils. Les constantes étaient les suivantes :

	Grand pendule.	*Wiechert.*
T_0 période	1s,0	3s,2
r frottement	1 ,0	0 ,4
v rapport d'amortissement	2 ,1	3 ,3
V_0 agrandissement statique	1200	160

La figure 32 donne la reproduction, grossie deux fois, des inscriptions du grand pendule et du Wiechert, relatives à ce séisme.

b) *Séisme du 7 octobre 1930, 270 km. Tyrol.*

On est frappé, en examinant l'inscription du grand pendule, de constater que l'agitation d'origine industrielle présente beaucoup moins d'importance que dans l'exemple précédent; elle affecte de plus une forme assez différente de l'aspect habituel (battements très réguliers, au lieu de trains d'importance très variable). Cela tient, d'une part, à ce que l'activité industrielle s'est montrée moins intense ce jour-là, d'autre part à ce que, en raison d'études faites à cette époque, l'appareil n'était pas dans ses conditions de fonctionnement optimum; les constantes étaient les suivantes :

	Grand pendule.	*Wiechert.*			*Galitzine.*
T_0	0s,9	3s,2	Pendule	T_0	11s,0
r	1, 0	0 ,5	Galvanomètre	T_1	11s,5
v	1 ,9	4 ,2	Const. d'amortissement	$[v.]$	+ 0 ,04
V_0	880	195	Constante de l'appareil	log. C_1	$\overline{3}$,64738

Ci-dessous le tableau des principales phases .

	Grand pendule.	*Wiechert.*	*Galitzine.*
P.....	23 h. 27 m 47 s.	23 h. 27 m. 46 s.	23 h. 27 m. 48 s.
$\overline{P}$.....	53	53	53
$R_i 2\overline{P}$.	28 04	28 03	»
$\overline{S}$.....	24	24	25
$R_i\overline{S}$...	28	28	28
$R_x\overline{S}$...	33	»	»
$R_i 2\overline{S}$..	44	45	»
$R_x 2\overline{S}$..	54	53	53

Les inscriptions sont reproduites en grandeur naturelle sur la figure 33, où sont indiquées les corrections des pendules (les interruptions de minute commencent 2^s avant la minute sur le Galitzine, et à la minute précise sur les autres appareils). Les phases sont beaucoup mieux marquées sur l'inscription du grand pendule que sur celles des autres appareils ; de plus, la phase $R_x\overline{S}$, bien visible sur celle du grand pendule, n'apparaît pas nettement sur les autres. Donc, à ces distances, bien que ne présentant pas une importance aussi grande que ceux des autres séismographes, les diagrammes du grand pendule sont encore d'une utilité évidente.

On peut noter une certaine différence d'allure des inscriptions : elle tient au fait que le grand pendule a seulement enregistré des ondes dont la période n'excède pas 1^s, tandis que les autres instruments ont enregistré des ondes dont la période atteint jusqu'à 3^s. Il est superflu de faire des comparaisons de maximums.

c) *Séisme du 7 juin 1931, 700 km. Mer du Nord.*

A de telles distances, les inscriptions du grand pendule sont beaucoup moins importantes que celles des autres appareils. Elles peuvent néanmoins présenter parfois un certain intérêt pour l'étude des premières phases, comme cet exemple le

prouve. Le phénomène ayant eu lieu pendant la nuit, aux heures où l'activité industrielle se ralentit, son étude a été facilitée. Les principales phases sont les suivantes :

	Grand pendule.	*Wiechert.*	*Galitzine.*
P.....	o h. 26 m. 52 s.	o h. 26 m. 52 s.	o h. 26 m. 52 s.
$R_s\overline{P}$ ..	27 18,5	27 18	» »
$R_{s2}\overline{P}$.	25	» »	» »
S.....	28 07	28 08	28 08
$R_s\overline{S}$ ..	49	» »	49

Les inscriptions de ce tremblement de terre ont encore permis de faire une comparaison des amplitudes de deux maximums qui apparaissent très nettement sur les trois appareils (une telle comparaison est extrêmement difficile pour des séismes plus rapprochés). Les résultats sont les suivants : ils sont suffisament concordants.

		Amplitudes.		
Heures.	*Périodes.*	*Grand pendule.*	*Wiechert.*	*Galitzine.*
o h. 29 m. 23 s.....	3 s.	22 μ.	25 μ.	27 μ.
o h. 29 m. 32 s.....	3 s.	29 μ.	28 μ.	25 μ.

Les constantes des appareils étaient, à cette époque-là :

	Grand pendule.	*Wiechert.*		*Galitzine.*
T_0	1s,0	3s,2	T_0	11s,0
r	1 ,0	0 ,4	T_1	11s,5
v	2 ,0	3 ,3	[μ]	0 ,00
V_0	1200	160	log C_1	$\overline{3}$,69037

La figure 34 représente les inscriptions obtenues avec les trois appareils, en grandeur naturelle.

Conclusion. — Les auteurs admettent, en général, que la période peut être quadruplée, ou au plus quintuplée par les dispositifs d'augmentation de période. Ce résultat est atteint pour le grand pendule, puisque sa période a été portée de 0s,2

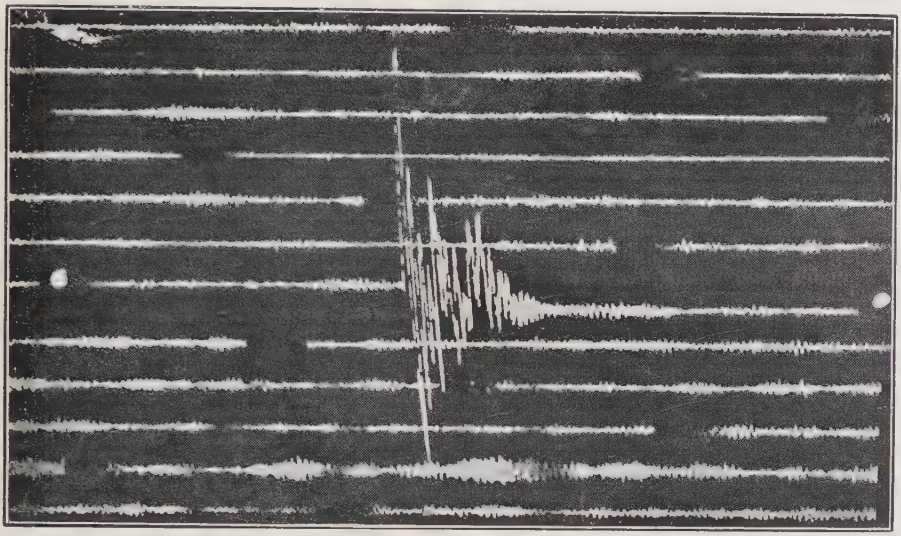
à 1^{s},0. Il ne semble pas que l'on puisse l'augmenter davantage, tout en conservant une stabilité suffisante. Les vibrations d'origine industrielle, sans disparaître complètement, sont devenues beaucoup moins gênantes; elles demeurent toutefois plus importantes que sur les composantes horizontales, tout au moins pendant la journée.

La période de 1^{s},0 étant plus petite que celle des composantes horizontales (1^{s},8 et 2^{s},2), le champ de la composante verticale est évidemment moins étendu que celui des composantes horizontales; cela ne présente qu'un inconvénient relatif, car cet appareil est spécialement destiné à l'étude des séismes proches.

EXPLOSION I

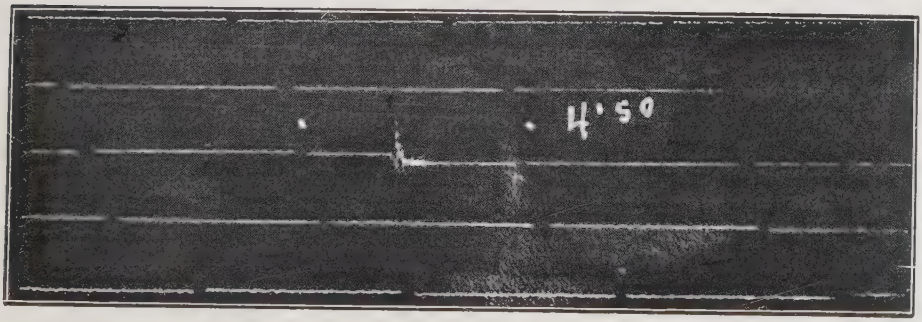
Inscriptions grossies 2 fois.

Vertical grand pendule.



$T_0 = 1^s,0$ $V_0 = 1200$

Vertical Wiechert de 1200 kgs.



$T_0 = 3^s,3$ $V_0 = 180$

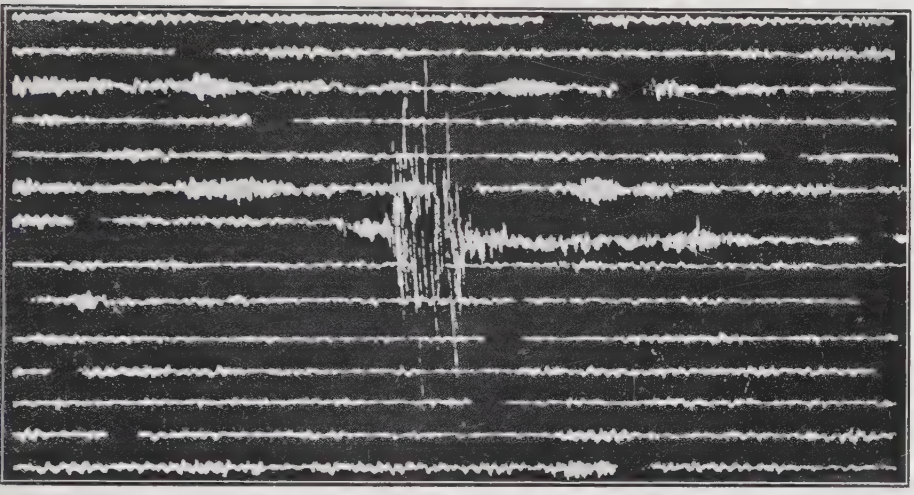
Les inscriptions d'explosions sont beaucoup plus importantes sur la composante verticale du grand pendule que sur le Vertical Wiechert de 1200 kg. Sur le Vertical Galitzine, elles manquent ou ont une très faible importance.

FIG. 30.

EXPLOSION II

Inscription grossie 2 fois.

Vertical grand pendule.



$T_0 = 1^s,0$ $V_0 = 1200$

Les autres appareils n'ont fourni aucune inscription.

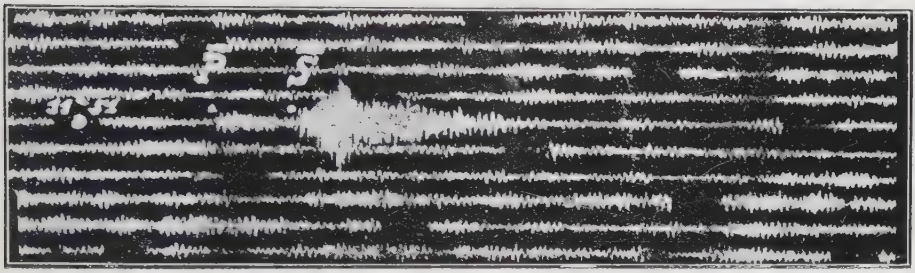
FIG. 31.

SÉISME DE LA FORÊT-NOIRE — 29 V 1930

70 km. $\overline{P}$ $11^h51^m19^s$

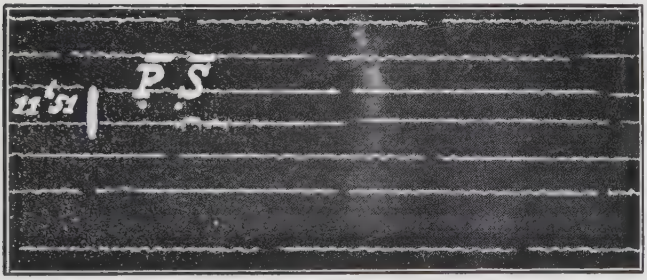
Inscriptions grossies deux fois.

Vertical grand pendule.



$T_0 = 1^s,0$ $V_0 = 1200$ Correction $+7^s$

Vertical Wiechert de 1200 kgs.



$T_0 = 3^s,2$ $V_0 = 160$ Correction $+7^s$

Pour les distances de cet ordre, les inscriptions du grand pendule sont toujours plus importantes que celles du Wiechert; souvent, comme dans le cas actuel, le Galitzine n'enregistre rien. La phase $\overline{P}$, très faible sur le Vertical Wiechert de 1200 kg, pourrait passer inaperçue, alors qu'elle est très nette sur le grand pendule.

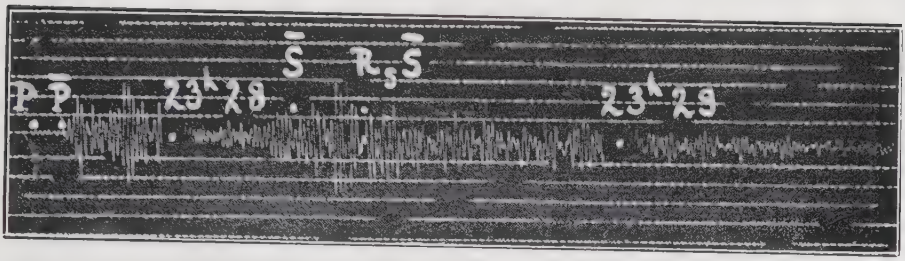
FIG. 32.

SÉISME DU TYROL — 7 X 1930

270 km. P $23^h27^m46^s$

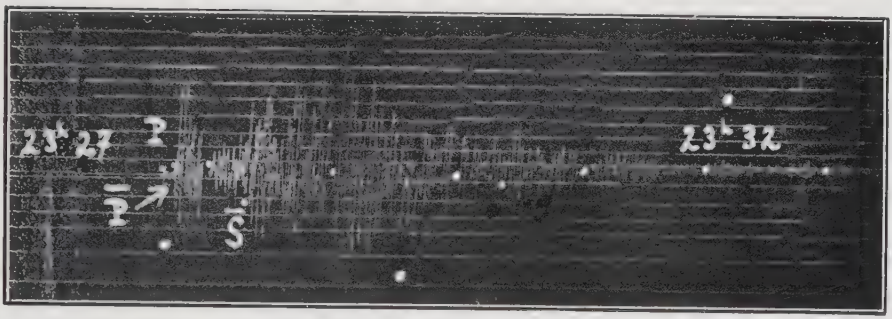
Grandeur naturelle.

Vertical grand pendule.



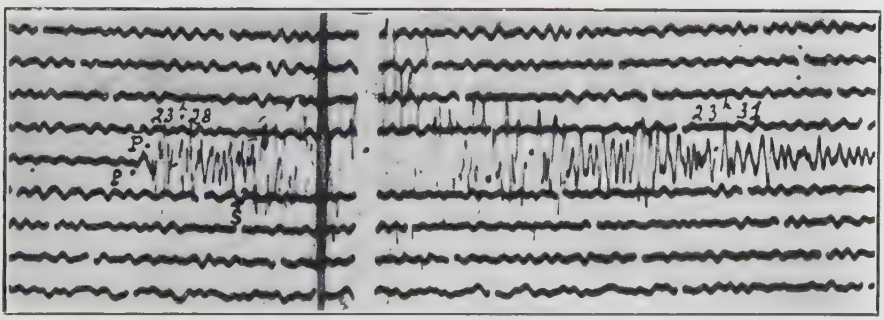
$T_0 = 0^s,9$ $V_0 = 880$ Correction $+6^s,4$

Vertical Wiechert de 1200 kgs.



$T_0 = 3^s,2$ $V_0 = 195$ Correction $+6^s,4$

Vertical Galitzine. Correction $+2^s,6$



$T_0 = 11^s,0$ $T_1 = 11^s,5$ $[\mu] = +0,04$ $\log C_1 = \bar{3},64378$

Bien que le grand pendule ne se soit pas trouvé dans les conditions de fonctionnement optimum, l'inscription obtenue, par suite de sa grande netteté, permet de distinguer les phases mieux que les inscriptions des autres appareils. Le grand pendule, en particulier, a seul inscrit nettement la phase $R_s\bar{S}$.

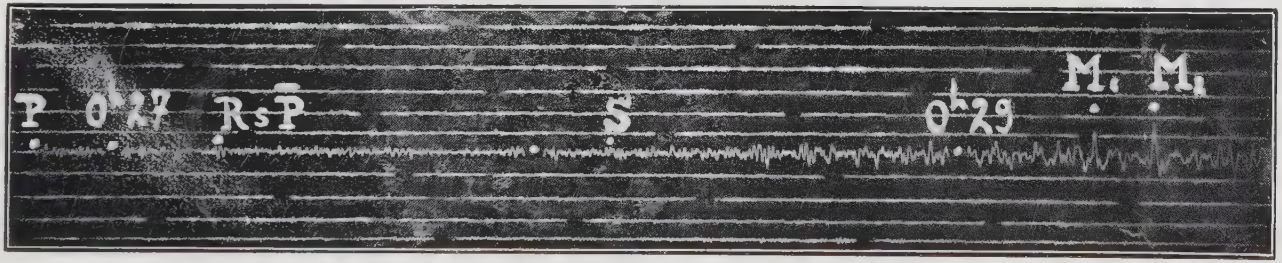
Fig. 33.

SÉISME DE LA MER DU NORD — 7 VI 1931

700 km. P $0^h26^m52^s$

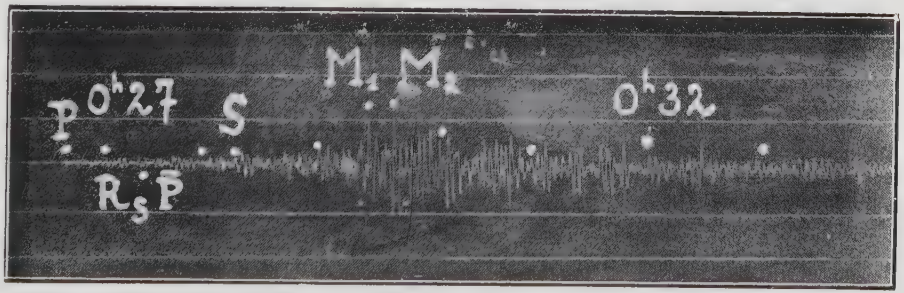
Grandeur naturelle.

Vertical grand pendule.



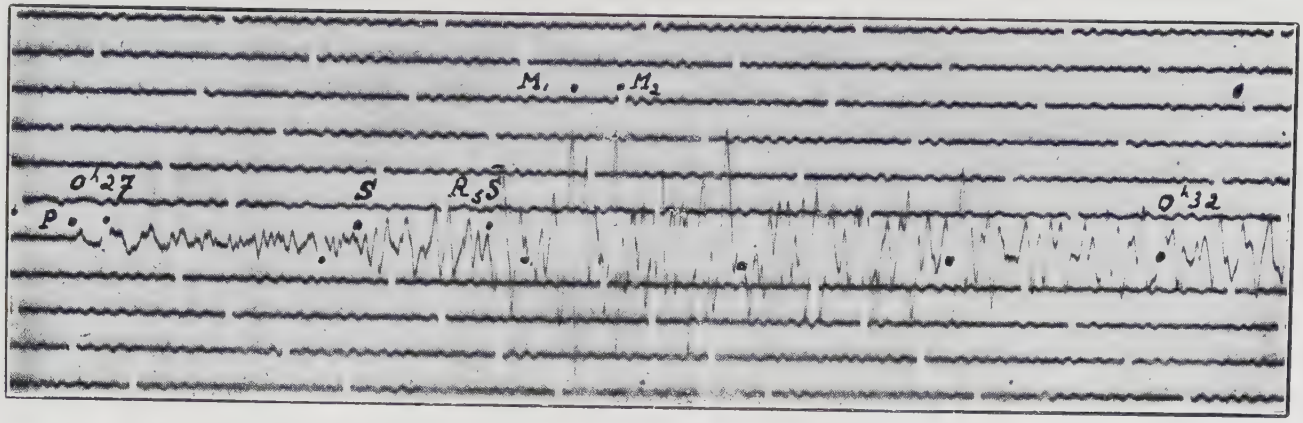
$T_0 = 1^s,0$ $V_0 = 1200$ Correction de pendule $+3^s,8$

Vertical Wiechert de 1200 kgs.



$T_0 = 3^s,2$ $V_0 = 160$ Correction $+3^s,8$

Vertical Galitzine. Correction $+2^s,6$



$T_0 = 11^s,0$ $T_1 = 11^s,5$ $[\mu] = 0$ $\log C_1 = \overline{3},690\,37$

Aux distances de cet ordre, les inscriptions du grand pendule sont moins importantes que celles des autres appareils. Il peut toutefois rendre des services pour l'observation des phases du début, surtout lorsque, comme dans le cas actuel, l'activité industrielle, au milieu de la nuit, est relativement réduite. On remarquera la correspondance des 2 maximums M_1 et M_2 sur les trois inscriptions. La comparaison des amplitudes mesurées sur les trois appareils conduit à des résultats suffisamment concordants.

FIG. 34.

CHAPITRE IV

SENSIBILITÉ DES APPAREILS A LA TEMPÉRATURE. COMPENSATION

On sait que les appareils verticaux sont très sensibles aux variations de la température, mais aucune publication, à ma connaissance, ne traite de l'importance des perturbations qu'elles entraînent : aussi ai-je cru bon d'en faire le calcul pour les différents types d'appareils. Je suivrai la division introduite dans le chapitre précédent (1re catégorie : masse fixée à un bras sur lequel vient s'attacher le ressort; 2e catégorie : masse suspendue directement aux ressorts). A cause de leur plus grande simplicité, j'exposerai d'abord les calculs relatifs aux appareils de la 2e catégorie.

2e Catégorie.

1. *Appareils Wiechert de 1200 kgr. de Quervain-Piccard. Grand pendule de Strasbourg.*

L'équation d'équilibre est $P = AL$, P étant le poids de la masse suspendue, A le coefficient d'élasticité des ressorts, et L leur allongement initial. Si l'on fait croître la température de 1°, le coefficient d'élasticité diminuera d'une quantité ΔA, et les ressorts s'allongeront d'une quantité ΔL. La nouvelle équation d'équilibre sera :

$$(A - \Delta A)(L + \Delta L) = P. \qquad (38)$$

D'où, en négligeant le produit $\Delta L . \Delta A$

$$A \Delta L = L \Delta L. \qquad (39)$$

Pour un ressort à boudin ayant n spires, le diamètre du fil étant d, et le diamètre du boudin étant D, on a :

$$\Lambda = \mu \frac{d^4}{8 D^3 n}. \qquad (40)$$

Le coefficient μ est, suivant les auteurs, appelé *module de Coulomb, de torsion, de rigidité, de glissement* ou *de cisaillement*. Je rappelle sa définition. Soit un bloc, en forme de parallélépipède rectangle, encastré, de section S. Il est soumis à une force tangentielle F. Les déformations étant supposées élastiques, une fibre, qui au repos était normale au plan d'encastrement, aura tourné d'un angle φ, tel que $\mu = \frac{F}{S}\varphi$. (41)

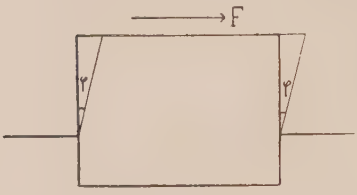


Fig. 35.

On démontre qu'il y a identité entre le module de Coulomb ainsi défini et le coefficient μ de Lamé, qui figure dans les équations de la théorie de l'élasticité.

Des équations (40) et (41) on tire : $\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta\mu}{\mu}$. (42)

L'amplitude moyenne de la variation annuelle de la température est, pour l'Observatoire de Strasbourg, comprise entre 12° et 14°. On peut admettre que, dans cet intervalle, la variation du coefficient d'élasticité du ressort est proportionnelle à la variation de température. J'admettrai donc que le coefficient thermo-élastique du ressort, défini par l'expression $\frac{1}{\mu}\frac{d\mu}{d\theta}$, est une constante précisément égale à $\frac{\Delta\mu}{\mu}$. Je désignerai ce coefficient par ε. Il viendra :

$$\Delta L = \frac{P}{\Lambda^2}\Delta\Lambda = \frac{P}{\Lambda}\varepsilon = \frac{T^2 g}{4\pi^2}\varepsilon = L\varepsilon, \qquad (43)$$

T étant la période de l'appareil, et L la longueur du pendule (égale, dans le cas considéré, à l'allongement initial des ressorts).

Pour le Wiechert de 1200 kgr., $\Delta L = 0$ mm, 065; pour le grand pendule de Strasbourg, $\Delta L = 0$ mm, 0026. Ces variations sont peu importantes; mais si, au moyen des dispositifs décrits plus haut, on fait croître la période, les variations produites seront beaucoup plus grandes.

Il est nécessaire, pour les calculer, d'établir l'équation d'équilibre, après hausse de 1°, en tenant compte de l'introduction des ressorts auxiliaires. On la déduit aisément des formules (28) et (31) :

$$(L + \Delta L)(\Lambda - \Delta\Lambda) - k(f - \Delta f)\Delta L = P. \qquad (44)$$

Je rappelle que f désigne la tension des ressorts auxiliaires; je montrerai d'abord qu'on peut négliger la variation Δf de cette tension; λ étant le coefficient d'élasticité, et l l'allongement des ressorts auxiliaires, la tension initiale est $f = \lambda l$. Après une hausse de température de 1°, le coefficient d'élasticité diminue d'une quantité $\Delta\lambda$, mais les ressorts se raccourcissent de Δl, par suite de l'allongement des ressorts principaux. Donc :

$$f - \Delta f = (l - \Delta l)(\lambda - \Delta\lambda) \qquad (45)$$

D'où

$$\Delta f = l\Delta\lambda + \lambda\Delta l. \qquad (46)$$

Pour le Vertical Wiechert de 1200 kgr., la période étant portée à 3s5, on a $l = 3$ cm. D'autre part $\lambda = 57{,}8 \times 10^4$; pour les aciers courants $\varepsilon = \frac{\Delta\mu}{\mu} = 250 \times 10^{-6}$.

D'où l'on tire $l\Delta\lambda = 450$ dynes.

D'après la formule (34), on a d'autre part :

$$\Delta l = d + D - \sqrt{d^2 + D^2 + 2Dd\left(1 - \frac{b^2}{a^2 c^2}\frac{dL^2}{2}\right)}. \qquad (47)$$

Je rappelle que $a = 3$ cm, $b = 14$ cm, 5, $c = 4$ cm, 5, $d = 20$ cm, et que pour une période de l'appareil $T_0 = 3^s5$, on a $D = 38$ cm. Je tire d'abord ΔL des formules (42) et (44), en négligeant Δf. On trouve $\Delta L = 0$ cm. 076. En portant cette valeur dans la formule (47), on tire, en première approximation, une valeur $\Delta l = 0$ cm, 036. D'où $\lambda \Delta l = 21{,}0 \times 10^3$ dynes. Par suite $\Delta f = 21{,}45 \times 10^3$ dynes. Or $f = 2$ kgr.; donc, en négligeant Δf devant f, on commet une erreur relative de l'ordre de 1/100, ce qui est admissible, au degré de précision des expériences.

L'équation d'équilibre se simplifiera donc, et pourra s'écrire :

$$(L + \Delta L)(\Lambda - \Delta\Lambda) - kf\Delta L = P. \qquad (48)$$

$$\text{D'où : } \Delta L = \frac{L\Delta\Lambda}{\Lambda - kf} = \frac{P\Delta\Lambda}{\Lambda(\Lambda - kf)} = \frac{P}{\Lambda - kf}\varepsilon. \qquad (49)$$

T_1 étant la période obtenue pour une tension f des ressorts auxiliaires, et L_1 la longueur du pendule synchrone, on aura :

$$\Delta L = \frac{T_1^2 g}{4\pi^2}\varepsilon = L_1\varepsilon. \qquad (50)$$

Les équations (50) sont une généralisation des équations (43). *Elles montrent que tout procédé permettant d'obtenir une augmentation de la période entraînera nécessairement un accroissement de la sensibilité à la température. L'allongement* ΔL *pour une hausse de température de 1° croît proportionnellement au carré de la période.*

II. *Appareil Straubel*, voir p. 11.

Cet appareil ne présente pas la même importance que les autres instruments de la deuxième catégorie : toutefois, je crois utile d'établir l'expression de sa sensibilité aux variations de la température, les calculs précédents n'étant pas applicables à ce séismographe.

Après une hausse de température de 1°, l'équation d'équilibre devient (voir équation 17) :

$$Mga - (\Lambda - \Delta\Lambda)(L + \Delta L)a + mg\frac{b}{a}\Delta L = 0. \qquad (51)$$

D'où $$\Delta L = \frac{Mg\Delta\Lambda}{\Lambda\left(\Lambda - \frac{b}{a^2}mg\right)} = \frac{L\Delta\Lambda}{\Lambda - \frac{b}{a^2}mg}. \qquad (52)$$

D'autre part : $\Lambda = \frac{8}{3}\frac{E s e^3}{C^3}$ (53), s désigne la largeur, e l'épaisseur de la lame ressort, et C la distance des points d'appui du ressort. E est le *module de Young* ou *de traction*. Je rappelle sa définition. Soit une barre cylindrique de section S et de longueur l. Les déformations étant supposées élastiques, elle est soumise à une force de traction F qui produit un allongement Δl. On a $E = \frac{F}{S} : \frac{\Delta l}{l}$.

Par suite : $$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta E}{E}. \qquad (54)$$

Ce dernier terme représente la variation d'élasticité avec la température du métal supportant des efforts de traction. Je le désignerai par η_1. Ce coefficient diffère du coefficient ε défini plus haut. L'équation devient :

$$\Delta L = \frac{Mg}{\Lambda - \frac{b}{a^2}mg}\eta_1 = L\eta_1. \qquad (55)$$

Cette formule ne diffère de l'équation (50) que par la substitution du coefficient η_1 au coefficient ε, et par la substitution du poids mg à la tension f des ressorts auxiliaires.

1re Catégorie.

1. *Appareil Ewing* (voir p. 8 et fig. 21).

C'est le cas le plus simple. Soient a la distance de l'axe du ressort à l'axe de rotation, r la distance du centre de gravité de la masse à cet axe. En équilibre à la position initiale on a :

$$\Lambda L a - M g r = 0. \tag{56}$$

Après hausse de température de 1°, le ressort s'allonge et son extrémité vient de H en H', le centre de gravité de la masse descendant de M en M'. Le ressort étant supposé très long par rapport à a, il n'y a pas lieu de tenir compte de sa rotation. L'angle $\Delta\theta$ dont a tourné le bras OM étant aussi très petit, on peut admettre que le moment des forces de pesanteur n'a pas changé. L'équation d'équilibre sera :

$$(\Lambda - \Delta\Lambda)(L + \Delta L) a - M g r = 0. \tag{57}$$

D'où
$$\Delta L = \frac{L}{\Lambda} \Delta\Lambda = L\varepsilon. \tag{58}$$

Cette formule ressemble à l'équation (50), mais il faut remarquer que L désigne l'allongement initial du ressort qui, ici, n'est plus égal à la longueur du pendule simple ayant la période du séismographe. La période de ce dernier est : $T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\Lambda a^2}}$ (12), K étant le moment d'inertie de la masse par rapport à l'axe de rotation. Soit ρ le rayon de giration de la masse. On a $K = M(\rho^2 + r^2)$, et $L = \frac{M g r}{\Lambda a}$.

Donc
$$\Delta L = \frac{T^2 g}{4\pi^2} \times \frac{a r}{r^2 + \rho^2} \varepsilon. \tag{59}$$

L'abaissement ΔG du centre de gravité de la masse sera :

$$\Delta G = \frac{T^2 g}{4\pi^2} \times \frac{r^2}{r^2 + \rho^2} \varepsilon . \qquad (60)$$

Pour une masse ponctuelle ($\rho = 0$), la formule (60) se ramène à l'équation (50).

II. *Appareils Galitzine et Wiechert de 80 kgr.*

(v. pp. 12 et 14.)

On sait que, pour ces deux types d'appareils, le ressort s'attache au-dessous du bras ; par suite, il est nécessaire de tenir compte de sa rotation et les calculs précédents ne s'appliquent plus.

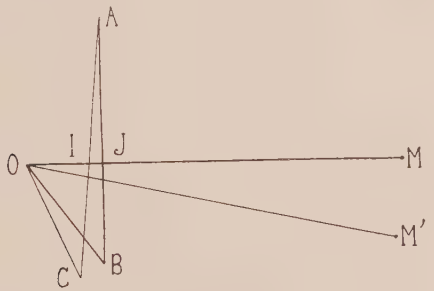


Fig. 36.

Soient O l'axe de rotation, M le centre de gravité de la masse, AB la position initiale du ressort, lorsque l'appareil est au zéro. Après hausse de température de 1°, la masse vient en M', et le ressort prend une nouvelle position AC. Le bras a tourné d'un angle $\widehat{MOM'} = \widehat{BOC} = \Delta\theta$. Le ressort a tourné d'un angle $\widehat{BAC} = \Delta\gamma$.

Posons AB $= Q$, BJ (distance de l'extrémité inférieure du ressort à l'axe) $= h$, OJ (distance du ressort à l'axe) $= a$, OM (distance de l'axe au centre de gravité de la masse) $= r$. A la position de zéro, l'équation d'équilibre est :

$$\Lambda L a - M g r = 0. \qquad (61)$$

Après une hausse de température de 1°, on aura :

$$(\Lambda - \Delta\Lambda)(L + \Delta L)\, a' - Mgr = 0, \qquad (62)$$

a' étant le nouveau bras de levier du ressort. On peut admettre que l'on a : $a' = a - IJ$, ce qui revient à confondre OI avec sa projection sur la perpendiculaire à AC.

Or,
$$IJ = (Q - h)\,\Delta\gamma. \qquad (63)$$

D'autre part, $\Delta\gamma = h\dfrac{\Delta\theta}{Q}$, et $\Delta\theta = \dfrac{\Delta L}{a}$. (64)

Par suite,
$$a' = a - h\left(1 - \frac{h}{Q}\right)\frac{\Delta L}{a}. \qquad (65)$$

La nouvelle équation d'équilibre sera donc :

$$(\Lambda - \Delta\Lambda)(L + \Delta L)\left[a^2 - h\left(1 - \frac{h}{Q}\right)\Delta L\right] - Mgra = 0. \qquad (66)$$

On en tire :

$$\Delta L = \frac{L\,\Delta\Lambda a^2}{\Lambda a^2 - \Lambda L h\left(1 - \dfrac{h}{Q}\right)}. \qquad (67)$$

L'équation se simplifie si on introduit la condition posée par Galitzine : $h = \dfrac{Q}{2}$. Il vient :

$$\Delta L = \frac{L a^2}{a^2 - L\dfrac{h}{2}}\,\varepsilon. \qquad (68)$$

Cette formule est une généralisation de la formule (58), à laquelle elle se réduit, si l'on fait $h = 0$ (appareil d'Ewing).

Ici encore $L = \dfrac{Mgr}{\Lambda a}$. De plus $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{K}{\Lambda a^2 - \Lambda L\dfrac{h}{2}}}$. (14)

Or $K = M(r^2 + \rho^2)$, donc :

$$\Delta L = \frac{T^2 g}{4\pi^2} \frac{ar}{r^2 + \rho^2} \varepsilon . \qquad (69)$$

Cette équation est identique à la formule (59). Le déplacement du centre de gravité de la masse sera encore donné par la formule (60), obtenue plus haut : $\Delta G = \frac{T^2 g}{4\pi^2} \frac{r^2}{r^2 + \rho^2} \varepsilon$. (60)

III. *Construction de Wilip* (voir p. 16).

J'ai indiqué plus haut que Wilip avait ajouté au Galitzine un deuxième ressort, dont le point d'attache est fixé au-dessus du

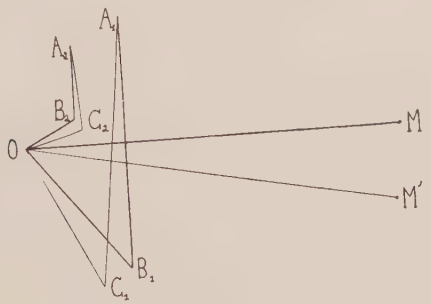


Fig. 37.

bras : j'indiquerai les effets de l'addition en question. Dans les calculs qui vont suivre, les termes relatifs au 1er ressort seront affectés de l'indice 1, ceux qui se rapportent au 2e ressort seront affectés de l'indice 2. A la position de zéro, l'équation d'équilibre est :

$$A_1 L_1 a_1 + A_2 L_2 a_2 = Mgr . \qquad (70)$$

Après une hausse de température de 1°, les ressorts se sont respectivement allongés de ΔL_1 et ΔL_2, et le bras a tourné d'un angle :

$$\Delta\theta = \frac{\Delta L_1}{a_1} = \frac{\Delta L_2}{a_2} . \qquad (71)$$

Les nouveaux bras de levier étant a'_1 et a'_2, l'équation d'équilibre deviendra :

$$(A_1 - \Delta A_1)(L_1 + \Delta L_1)a'_1 + (A_2 - \Delta A)(L_2 + \Delta L_2)a'_2 = Mgr. \quad (72)$$

Or
$$\left\{\begin{aligned} a'_1 &= a_1 - h_1\left(1 - \frac{h_1}{Q_1}\right)\Delta\theta, \\ a'_2 &= a_2 + h_2\left(1 + \frac{h_2}{Q_2}\right)\Delta\theta. \end{aligned}\right\}, \quad (73)$$

Q_1 et Q_2 étant les longueurs initiales des deux ressorts. On en tire :

$$\Delta L_1 = \frac{L_1 \Delta A_1 a_1^2 + L_2 \Delta A_2 a_1 a_2}{A_1 a_1^2 + A_2 a_2^2 - A_1 L_1 h_1\left(1 - \frac{h_1}{Q_1}\right) + A_2 L_2 h_2\left(1 + \frac{h_2}{Q_2}\right)}. \quad (74)$$

Si les ressorts ont même coefficient thermo-élastique ε, on aura :

$$\Delta L_1 = \frac{Mgr a_1 \varepsilon}{A_1 a_1^2 + A_2 a_2^2 - A_1 L_1 h_1\left(1 - \frac{h_1}{Q_1}\right) + A_2 L_2 h_2\left(1 + \frac{h_2}{Q_2}\right)}. \quad (75)$$

Or, on a $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{K}{A_1 a_1^2 + A_2 a_2^2 - A_1 L_1 h_1\left(1 - \frac{h_1}{Q_1}\right) + A_2 L_2 h_2\left(1 + \frac{h_2}{Q_2}\right)}}$. (15)

On a donc encore $\Delta L_1 = \dfrac{T^2 g}{4\pi^2}\dfrac{ar}{r^2 + \rho^2}\varepsilon$ (59)

et
$$\Delta G = \frac{T^2 g}{4\pi^2}\frac{r^2}{r^2 + \rho^2}\varepsilon. \quad (60)$$

Ces deux formules s'appliquent donc à tous les appareils de la première catégorie.

IV. *Effets de la dilatation.*

Les formules (59) et (60) expriment uniquement l'effet de la variation du coefficient d'élasticité des ressorts avec la température. Il convient de rechercher si la dilatation des différentes pièces du séismographe proprement dit n'entraîne pas des effets appréciables. Je me bornerai au cas du séismographe Galitzine.

1° *Dilatation du bras.* — On a $r = 33$ cm. Le coefficient de dilatation du bras, en laiton, étant 19×10^{-6}, une hausse de température de 1° entraîne un allongement $\Delta r = 0$ cm., 0007. La dilatation du bras a pour effet d'augmenter le moment des forces de pesanteur, et par suite le moment de la tension du ressort. Or $L = \frac{Mgr}{\Lambda a}$.

Par suite, on peut admettre $\Delta L = L \frac{\Delta r}{r}$.

D'où $\Delta L = 0$ cm., 0034 pour une hausse de 1°.

2° *Dilatation du support.* — La dilatation combinée du bras et du support entraîne encore un allongement du ressort. Pour

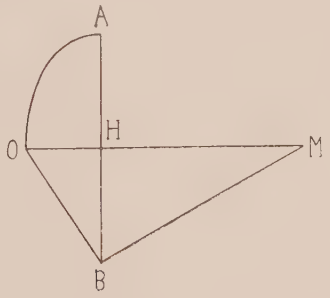


Fig. 38.

la partie AH, c'est le support (acier) qui est en jeu; pour la partie HB, c'est le bras (laiton). L'allongement correspondant du ressort sera :

$$\Delta L = (16 \times 12 + 20 \times 19) \times 10 = 0 \text{ cm.}, 00047.$$

Pour un appareil Galitzine à ressort en acier courant, la variation de longueur due à la thermo-élasticité du ressort est $\Delta L = 0$ cm., 004; par suite, les effets de dilatation peuvent être négligés devant les effets de la variation d'élasticité du ressort.

Je reviendrai plus loin sur le cas où l'on utilise un ressort en élinvar.

Influence de la température sur le dispositif d'amplification.

Je n'ai considéré dans ce qui précède que les déplacements de la masse, ou du bras auquel elle est fixée; il faut aussi rechercher comment se comporte le dispositif d'amplification. Il y a deux cas à distinguer.

I. *Inscription sur noir de fumée.*

1° *Le rapport d'amplification peut être considéré comme constant.* — En effet, les leviers sont faits d'une seule pièce, sauf celui qui porte la plume, qui est généralement partie aluminium, partie laiton. Après une hausse de température de 1°, le rapport q d'amplification deviendra $q \times \frac{1+\alpha}{1-\beta}$, α étant le coefficient de dilatation de l'aluminium, et β celui du laiton. $\alpha = 29 \times 10^{-6}$ et $\beta = 19 \times 10^{-6}$. Pour une hausse de 1°, l'erreur commise en négligeant cette correction est seulement de l'ordre de 10^{-5}; et pour les amplitudes annuelles de variation de température observées à la station séismologique de Strasbourg (12 à 14°), l'erreur sera encore insignifiante.

2° *Dans les grands appareils, la dilatation des tiges de liaison entraîne des effets très appréciables.* — Dans le cas du pendule de 19 tonnes de Strasbourg, par exemple, la première tige en acier, longue de 90 cm., s'allongera pour 1° d'une quantité égale à $90 \times 12 \times 10^{-6} = 0$ cm., 0011. L'amplification étant de 3000, on aura sur le papier une déviation de 3 cm., 3 par de-

gré. L'allongement de la deuxième tige, en laiton, de 32 cm., sera $32 \times 19 \times 10^{-6} = 0$ cm.,00074. L'amplification étant de 300, la déviation correspondante sur le papier sera 0 cm.,01. La déviation totale sera de 3 cm.,5 par degré.

Cet effet se retranche de celui produit par la variation d'élasticité des ressorts : il équivaut à une élévation de la masse, la variation d'élasticité des ressorts provoquant au contraire un abaissement de cette dernière.

II. *Inscription galvanométrique. Séismographe Galitzine.*

La température est sans action sur les leviers optiques. De plus les variations étant progressives, les déplacements du bras sont très lents, et ne peuvent entraîner la production de courants induits dans les bobines. Par suite, le zéro de l'inscripteur ne varie pas. Mais si le bras n'est plus horizontal, le fonctionnement de l'appareil devient défectueux : le séismographe inscrit non seulement les vibrations verticales, mais aussi, dans une certaine mesure, des vibrations horizontales. La mesure des amplitudes cesse alors d'être correcte, les valeurs calculées pour l'agrandissement dynamique n'étant plus exactes.

L'agrandissement dynamique est fonction de la température. J'ai indiqué plus haut son expression (voir p. 72) :

$$V = \frac{T}{C_1(1+u_1^2)(1+u^2)\sqrt{1-[\mu]\left(\frac{2u}{1+u^2}\right)^2}}. \qquad (37)$$

De plus, $C_1 = \frac{KA_1}{\pi l}$, A_1 étant la distance du miroir au cylindre enregistreur, l la longueur du pendule obtenu en détachant le ressort, tournant le support de 90°, et laissant la masse osciller librement, et K étant le facteur de transformation :

$$K = \frac{4H_1N_1S_1HNaI}{K_1(R+\rho)} \qquad (76)$$

formule où H_1 et N_1 désignent le champ magnétique de l'aimant et le nombre de spires du cadre du galvanomètre, H et N les éléments correspondants pour les aimants et les bobines du pendule; S est la surface d'une spire du cadre du galvanomètre, a le côté d'une spire des bobines du pendule, et D la distance de leur axe à l'axe de rotation du pendule. K_1 est le moment d'inertie du cadre, ρ sa résistance, et R la résistance du circuit extérieur.

J'examinerai l'influence des différents éléments qui entrent en jeu.

1° *Constante de torsion du fil du galvanomètre.* — Elle est donnée par l'expression $C = \mu \frac{\pi r^4}{2l}$, μ étant le module de Coulomb[1], r le rayon, et l la longueur du fil. μ croît avec la température, donc C également et la période $T = 2\pi \sqrt{\frac{K_1}{C}}$ diminue. Les fils d'argent qui relient le cadre aux bornes du galvanomètre ont aussi une influence, mais d'importance moindre.

On a observé qu'au cours d'une année la variation de période d'un galvanomètre d'environ 12^s de période moyenne peut au maximum atteindre $0^s,3$. L'influence sur l'agrandissement varie suivant la période du mouvement inscrit; je me limiterai au cas des périodes courantes, comprises entre 0 et 20^s.

J'ai déjà indiqué plus haut qu'à la station séismologique de Strasbourg, l'amplitude de la variation de température annuelle était comprise entre 12 et 14°. Accidentellement, il peut se produire des variations plus fortes : par exemple quand à un hiver rigoureux succède un été particulièrement chaud. Dans les calculs qui vont suivre, je me fixerai donc une limite exagérée (20°) de l'amplitude des variations de température, afin d'obte-

1. J'ai tenu à conserver les notations usuelles des ouvrages de séismologie d'une part, et celles de la théorie d'élasticité et de la résistance des matériaux, d'autre part. Il faudra éviter de confondre [μ], la constante d'amortissement, et μ, le module de Coulomb.

nir une limite supérieure des variations de l'agrandissement statique.

D'après cela, la variation $\frac{\Delta V}{V}$ de l'agrandissement statique due à la variation du coefficient d'élasticité du fil de torsion du galvanomètre sera au maximum — 2/100.

2° *Résistances électriques.* — Les fils sont en laiton, ayant un coefficient de température $\alpha = + 0{,}004$, la variation de résistance pour 1° est donnée par

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0}(1 - \alpha)$$

d'où

$$\frac{\Delta V}{V} = - 0{,}004 \text{ pour } 1°.$$

Pour 20°, la variation sera — 8/100.

3° *Champ magnétique des aimants.* — La variation produite par la température sur le moment magnétique M de l'aimant est donnée par $M = M_0 (1 - a\theta)$. Le champ H étant uniforme, on a également $H = H_0 (1 - a\theta)$. a est très variable d'un aimant à l'autre; pour l'acier, il varie de 0,0002 à 0,0009 (1). Je n'aurais pu mesurer a pour les aimants du séismographe et du galvanomètre sans interrompre le fonctionnement de l'appareil pendant une durée trop longue pour que cette suspension fût sans préjudice pour l'étude régulière des tremblements de terre. J'ai donc fait les calculs en prenant $a = 0{,}0009$. Dans ces conditions, pour 20° et pour l'ensemble des deux systèmes (pendule et galvanomètre) on a

$$\frac{\Delta V}{V} = - 4/100.$$

4° *L'influence de la dilatation sur les bobines et sur le bras* n'entraîne au maximum qu'une variation de quelques millièmes, qui peut être négligée.

1. Voir Mascart, **22**, p. 129. Ses résultats sont confirmés par des recherches récentes (J. Debrach, **10**).

5° *Total.* — On a $\Sigma \frac{\Delta V}{V} = -14/100$ pour une amplitude de variation annuelle de 20°. Je répète qu'il s'agit là d'une limite supérieure, qui, dans la pratique, ne pourrait être atteinte que tout à fait exceptionnellement. Le résultat obtenu est en accord avec les variations observées lors de la prise périodique des constantes de l'instrument.

Un étalonnage préalable pourrait donc permettre de connaître la valeur du facteur de transformation pour les diverses températures avec une précision suffisante; une telle opération serait toutefois rendue un peu illusoire par l'incertitude que comporte la mesure de l'amortissement.

Autres appareils.

Dans le deuxième chapitre, j'ai signalé qu'il serait nécessaire de soumettre les appareils de *Wenner* (voir p. 18) et de *Benioff* (voir p. 20) à des comparaisons avec les instruments classiques en usage. Ces études n'ayant pu encore être menées à bonne fin, je me bornerai à quelques remarques relativement à leur sensibilité à la température.

Tout l'exposé consacré à l'appareil Galitzine est applicable à l'instrument de Wenner.

L'appareil Benioff se rattache par sa suspension à la deuxième catégorie; mais, d'autre part, comme le Galitzine, il comporte l'inscription galvanométrique. On peut étudier sa sensibilité à la température en suivant une marche analogue à celle des calculs précédemment développés, mais des éléments interviennent qui n'existent pas dans le pendule de Galitzine. On devra tenir compte de la variation des réluctances; pour les parties métalliques, cette variation est due à la variation de la perméabilité magnétique avec la température. D'autre part, la longueur de l'entrefer variable change, quand par suite de la variation d'élasticité du ressort, la position d'équilibre de la masse et de l'armature est modifiée. Il est à craindre que la sensibilité de cet appareil ne soit exagérée, tout au moins si on lui donne l'amplification maximum prévue par l'auteur.

Conclusions.

Sauf le cas où l'on dispose de salles à température constante, il est absolument indispensable de munir les séismographes verticaux de dispositifs de compensation de température. D'une façon générale, il faut parer aux effets de la variation d'élasticité des ressorts; l'effet de la dilatation des tiges de liaison ne saurait être négligé dans les grands appareils.

Pour les appareils à inscription galvanométrique, il se produit en outre des variations de l'agrandissement dues aux effets de la température sur les diverses parties du système de transmission. Ces effets apportent un certain degré d'incertitude dans la mesure des amplitudes.

Différents types de dispositifs de compensation.

Ils sont évidemment basés sur des principes très différents, car : 1° on peut faire appel à toute propriété physique variant linéairement avec la température pour déplacer le point d'appui d'un des leviers d'une quantité convenable; 2° on peut faire varier la masse ou la longueur du pendule suivant une loi appropriée; 3° on peut choisir des ressorts dont le coefficient thermo-élastique soit particulièrement petit (alliage fer-nickel, renfermant 34 °/₀ de nickel et 12 °/₀ de chrome, dit *élinvar*). D'autres procédés pourraient encore être imaginés

Je passerai en revue les dispositifs existants, et je décrirai ensuite celui que j'ai installé sur le grand pendule de Strasbourg.

I. *Dispositif basé sur la dilatation.*

Ce procédé semble dû à Schlüter[1]. Il a également été employé par Wiechert[2] dans son appareil de 80 kgs. et dans celui de 1200 kgs. J'en exposerai le principe dans le cas de ce dernier

1. 33, p. 442.
2. 8, p. 14.

instrument. Soit GA la tige de poussée partant du centre de gravité G et AOB le premier levier oscillant autour de l'axe O. Après une hausse de température de 1°, les ressorts s'allongeront et la masse s'abaissera d'une quantité ΔL. La tige GA prendra la position G'A' ($AA' = GG' = \Delta L$). Le levier AOB prendra la position A'O'B'. On se propose de maintenir le point B fixe quand la température varie : il suffit pour cela de déplacer l'axe O d'une quantité proportionnelle à la température, et qui sera, pour une hausse de 1°,

$$OO' = \frac{b}{a+b}\Delta L \qquad (77),$$

en posant $OA = a$ et $OB = b$.

On utilise à cet effet la dilatation d'une barre verticale en zinc CD fixée au bâti en fer en C et dont l'extrémité D agit sur l'axe O par l'intermédiaire d'un levier amplificateur DME mobile autour de l'axe M, et d'une tige verticale de liaison EO. Après hausse de température de 1°, la barre CD se dilate d'une quantité DD', l'axe M, lié au bâti en fer se déplace de MM' par suite de la dilatation de ce dernier, et le levier DME prend la position D'M'E'; l'axe O vient en O'.

Posons $DM = a'$ et $EM = b'$.

Pour que le point B reste immobile, quelles que soient les variations de température, les conditions géométriques sont :

$$DD' - \frac{a'+b'}{b'}MM' = \frac{a'}{b'}\cdot\frac{b}{a+b}\Delta L. \qquad (78)$$

Aucun réglage n'a été prévu : par suite, *le dispositif une fois installé, il n'y aura compensation exacte que pour une valeur donnée de* ΔL; ΔL étant proportionnel au carré de la période, la compensation ne sera donc exacte que pour une valeur donnée de la période du séismographe. Si on donne à la période une valeur plus grande, la compensation sera incomplète; si on lui donne une valeur plus petite, les déviations de la plume sous l'action des variations de température seront en sens contraire de celles

qui se produiraient en l'absence de dispositif. Il faudrait, pour

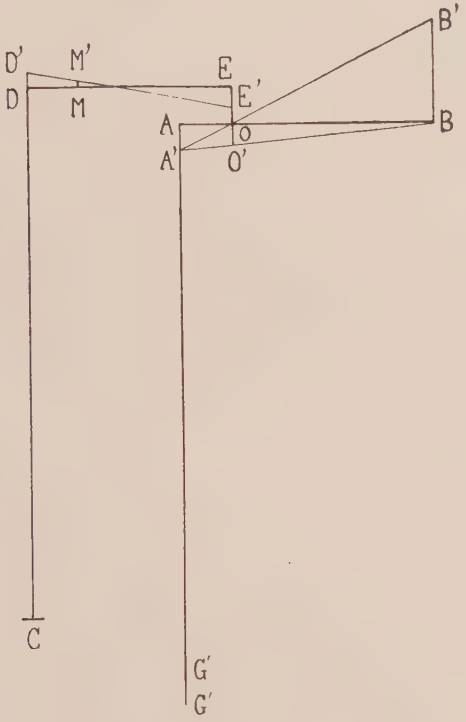


Fig. 39.

parer à cet inconvénient, prévoir une construction permettant de faire varier le rapport $\frac{a'}{b'}$.

Le coefficient de dilatation du zinc étant 29×10^{-6}, celui du fer 12×10^{-6}, et la barre CD ayant 90 cm. de longueur, on a :

$$DD' - \frac{a'}{a' + b'} MM' = 14 \times 10^{-6} \times 90$$

$$(a' = 3\,\text{cm.} \quad b' = 12\,\text{cm.}).$$

Or $\frac{a'}{b'} \times \frac{b}{a+b} = 0{,}16$. D'où $\Delta L = 0$ cm. 0079.

D'autre part la tige GA, longue de 1 m. 20, se dilate d'une quantité égale à $120 \times 12 \times 10^{-6} = 0$ cm. 0014.

L'allongement compensé sera donc, en tout, 0 cm. 0093. La formule (43) donne : $\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \mu}{\mu}$.

Le coefficient thermo-élastique étant 250×10^{-6}, on en tire L = 38 cm. : d'où T = 1s,3. La période usuelle de l'instrument étant 3s,5, on s'explique que la compensation ne soit que partielle (déviation de 12 mm. pour 1°).

Certains auteurs ont modifié le dispositif en associant des tiges de métaux différents (par exemple laiton — fer — zinc) : d'où le nom de compensation à grille qu'on a parfois donné à cette construction[1].

Wilip a également utilisé la dilatation dans son premier dispositif de compensation de l'appareil vertical Galitzine. Deux paires de tiges métalliques, d'environ 70 cm. de long, ont pour rôle de déplacer deux boules fixées sur des leviers horizontaux mobiles autour d'axes verticaux. Ces tiges sont constituées par deux métaux dont les coefficients de dilatation sont différents; par suite, les variations de température ont pour effet de déplacer le centre de gravité de la masse oscillante, en modifiant sa distance à l'axe de rotation.

Dans la formule (68), $\Delta L = L\varepsilon \frac{a^2}{a^2 - L\frac{h}{2}}$,

on a $L = \frac{Mgr}{\Lambda a}$ (voir p. 88).

Par suite, la variation ΔL n'est pas proportionnelle à la variation de r, distance du centre de gravité à l'axe de rotation.

Il n'est donc pas possible d'obtenir par ce procédé une compensation parfaite.

Ce dispositif fonctionne à l'Observatoire de De Bilt[2] (tiges d'acier et de magnalium[3]) et à celui d'Abisko (tiges d'acier et

1. Voir L. Mintrop, **24**, p. 365.
2. Voir E. van Everdingen, **11**, p. VIII.
3. Le magnalium est un alliage Al-Mg (Mg, 2 à 12 %); densité, 2,4

de zinc). D'après M. Bruno Rolf[1], directeur de l'observatoire d'Abisko, la sensibilité à la température est devenue 5 fois moindre, mais on est tout de même obligé de procéder tous les 2 ou 3 jours à des réglages, bien que la variation journalière de température dans la salle des instruments excède rarement $0^{\circ},1$.

Aussi Wilip a-t-il renoncé à ce dispositif pour avoir recours à des bilames.

II. *Compensation à bilames.*

On sait qu'un système formé de deux lames de métaux différents, accolés et soudés, se déforme quand la température varie : si le métal le plus dilatable est placé du côté de la convexité, la courbure croît avec la température. Ce principe, que je rappelle brièvement ci-dessous, est utilisé dans la construction de certains appareils : thermomètres enregistreurs, spiraux compensateurs en horlogerie.

Soient deux lames concentriques formant des éléments de cylindre de révolution, soudées l'une à l'autre, et constituées par des métaux ayant des coefficients de dilatation et des modules d'élasticité différents. L'allongement élémentaire ε à une température donnée[2] est lié à l'allongement initial ε_0 par la formule :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + x\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right), \qquad (79)$$

ρ et ρ_0 étant les rayons de courbure de la lame aux températures considérées et x étant la distance de l'élément au cylindre de contact des deux métaux, comptée positivement vers la

à 2,7 (Al : 2,64); Résistance à la rupture, 30 à 36 kgs./mm² (Al étiré à froid : 33 au maximum); coefficient de dilatation 24×10^{-6}. Sa facilité de travail le rend comparable au laiton.

1. Je tiens à remercier ici M. Bruno Rolf, et M. van Dijck, de l'Observatoire de De Bilt, pour les renseignements qu'ils m'ont aimablement fournis.

2. Voir H. Bouasse, 7, p. 152.

convexité. On pose l'équation des tensions mises en jeu, on explicite leur équilibre, on intègre, et on arrive à la formule :

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} = Kt, \tag{80}$$

t étant la température, avec :

$$K = \frac{2}{3}\frac{e}{\alpha_2 - \alpha_1}\left[1 + \frac{(E_2 e_2^2 - E_1 e_1^2)^2}{4e^2 E_1 E_2 e_1 e_2}\right] \tag{81}$$

e étant l'épaisseur totale, e_1 et e_2 les épaisseurs des deux lames, α_1 et α_2 les coefficients de dilatation, E_1 et E_2 les modules de Young. Le maximum de sensibilité est obtenu pour $E_2 e_2^2 = E_1 e_1^2$. En se plaçant dans ces conditions, on a :

$$\varepsilon = \frac{t}{e}(e_1\alpha_1 + e_2\alpha_2) + 3\frac{x}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) \tag{82}$$

avec l'invar et le laiton : $\frac{E_1}{E_2} = 1{,}5$, $\frac{e_2}{e_1} = 1{,}23$ par suite, $\varepsilon = 10 \times 10^{-6}$ pour 1° à la surface de contact.

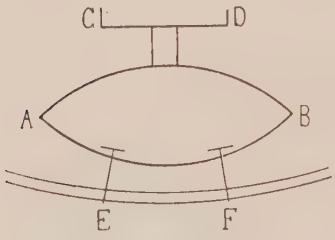


Fig. 40.

Straubel[1] emploie deux bilames d'acier et de laiton fixées ensemble par leurs extrémités AB. La bilame supérieure est fixée par le système CD à la tige de poussée qui transmet le mouvement de la masse; la bilame inférieure est fixée par les vis EF au ressort inférieur de suspension.

Quand la température augmente, par suite de la variation d'élasticité des ressorts, la masse s'abaisse; mais, d'autre part, la courbure des bilames augmente, et le système CD remonte.

1. **37**, p. 597.

Il suffit d'obtenir pour les bilames une augmentation de courbure telle que CD reste à la même position. On y parvient en serrant plus ou moins les vis EF qui permettent de régler à volonté la courbure initiale des bilames.

Avant compensation, la déviation du point lumineux sur la feuille était de 27 cm. par degré, après réglage, il n'y avait plus de déviation appréciable : les résultats sont donc pleinement satisfaisants.

Wilip[1], sur ses nouveaux appareils construits par la maison Masing à Tartu, utilise deux spirales bilames en acier et invar. L'extrémité intérieure de chacune d'elles est fixée au bras, l'autre, libre, porte une masse dont la position est réglable. On peut, de la sorte, fixer à volonté la courbure initiale. Quand la température s'élève, la masse se trouve déplacée par la déformation de la spirale : son déplacement est proportionnel à la variation de température (ce qu'on voit aisément d'après les formules rappelées plus haut). On arrive donc à faire varier à volonté la position du centre de gravité du système oscillant, mais pour la raison exposée précédemment, il n'est pas possible de parvenir à une compensation parfaite.

Les masses compensatrices sont de 417 gr.,5. Les spirales placées horizontalement dans un premier dispositif ont ensuite été installées verticalement. L'effet de température s'est trouvé ainsi fortement réduit. Pour une variation journalière de quelques degrés, le déplacement de l'index placé à l'extrémité du bras n'est plus que de 3 à 5 mm. : c'est un progrès indéniable, mais les résultats ne sont pas encore suffisants.

III. *Utilisation de ressorts en élinvar.*

On sait que le coefficient thermo-élastique de l'acier renfermant 34 °/₀ de nickel et 12 °/₀ de chrome, dit *élinvar*, est très petit. En raison de cette remarquable propriété, cet alliage est couramment employé dans l'industrie horlogère. M. Rothé a

1. 46 et 47.

eu l'idée de l'appliquer à la construction de certains appareils scientifiques : il a fait fabriquer à cet effet un ressort en élinvar, destiné à remplacer le ressort en acier ordinaire, utilisé jusque-là dans tous les séismographes verticaux Galitzine.

Depuis la mise en place de ce ressort, dont M^lle^ Dammann fut chargée de faire l'étude[1], le Galitzine de Strasbourg a fait preuve d'une stabilité remarquable. L'index fixé au bout du bras, dans les conditions les plus défavorables, s'est déplacé d'une quantité comprise entre 1 et 2 mm.

Si on reprend la formule :

$$\Delta L = L\varepsilon \frac{a^2}{a^2 - Lh\left(1 - \frac{h}{Q}\right)} \qquad (67)$$

en y portant les valeurs $L = 17$ cm., $a = 12$ cm., $h = 20$ cm., $Q = 36$ cm. et $\varepsilon = 15 \times 10^{-6}$, on obtient $\Delta L = 262 \times 10^{-6}$ cm. La longueur du bras étant de 83 cm., le déplacement ΔI de l'index sera, pour 1 degré, $\Delta I = 0$ mm. 018.

Il est nécessaire de tenir compte de la dilatation du bras et du support, qui entraîne des déplacements du même ordre. J'ai déjà fait ce calcul plus haut (p. 91). On trouve pour le bras 0 mm. 0034, et pour le support 0 mm. 0047. La valeur totale correspondante pour ΔI est 0 mm. 083. Pour l'amplitude limite de variation de température de 20° considérée plus haut, on aura une déviation de l'index égale à 1 mm. 7. La variation annuelle observée pour la température n'ayant pas atteint 20° dans la salle des Galitzine, il en résulte que la valeur observée est un peu supérieure à la valeur calculée; cet écart peut être attribué à la variation d'élasticité des lamelles constituant l'axe de rotation et des pièces d'attache des ressorts.

Tandis qu'avec l'ancien ressort il était nécessaire de surveiller constamment l'appareil Galitzine, et de procéder à de fréquents réglages pour maintenir l'horizontalité du bras, depuis l'installation du ressort en élinvar un réglage par an

1. 9, p. 247.

est amplement suffisant pour assurer le fonctionnement de l'instrument dans de bonnes conditions.

L'utilisation d'un ressort en élinvar est donc la méthode la plus recommandable : si elle ne permet pas d'éliminer complètement les effets de température, elle permet, tout au moins, de les réduire tellement qu'ils cessent d'être gênants.

IV. *Compensation hydraulique.*

Actuellement, l'élinvar n'est produit que par petites quantités, et il serait sans doute difficile et onéreux d'obtenir dans l'industrie des ressorts ayant les dimensions requises par les pendules à lourde masse : c'est pourquoi d'autres dispositifs ont dû être étudiés pour ces derniers.

De Quervain et Piccard[1] ont installé un dispositif de compensation hydraulique sur le grand séismographe de Zurich. Le principe consiste à faire varier automatiquement la masse de telle sorte que son centre de gravité se maintienne toujours à la même hauteur, quelles que soient les variations de la température.

L'augmentation de charge ΔP correspondant à un abaissement de la masse égale à ΔL est :

$$\Delta P = (\Lambda - kf)\,\Delta L. \qquad (29)$$

D'autre part, $\Delta = L\varepsilon$ et $L = \dfrac{Mg}{\Lambda - kf}$.

Pour une hausse de température de 1°, $\Delta P = Mg\,\varepsilon$ (83).

Il suffira donc, pour une telle variation, d'alléger la masse de cette quantité, et pour la variation de sens contraire, de la surcharger d'une quantité égale. ΔP dépend uniquement de la masse et du coefficient thermo-élastique des ressorts.

Donc, le système une fois réglé, on pourra faire varier la tension f des ressorts auxiliaires, et par suite la période de l'appareil, sans avoir à modifier quoi que ce soit au réglage du disposi-

1. **28**, p. 40 et **29**, p. 18.

tif de compensation. Cette méthode est la seule qui permette d'obtenir un pareil résultat.

La variation annuelle de température à l'Observatoire de Zurich étant d'environ 15°, il faudra pouvoir faire varier la masse de 80 kgs. au maximum. Toutes les minutes, le courant électrique qui soulève les plumes pour marquer les temps met automatiquement en jeu l'un ou l'autre de deux électro-aimants; chacun d'eux commande un robinet pouvant ouvrir ou fermer une conduite d'eau. Quand l'un est ouvert, de l'eau est envoyée dans un récipient placé sur la masse; quand c'est l'autre, l'eau s'écoule de ce récipient. La position de la masse est ainsi réglée automatiquement chaque minute.

Cet ingénieux système comporte plusieurs inconvénients : d'abord, il est délicat à construire et à régler par suite du grand nombre de ses pièces; il est de plus fort encombrant. Il nécessite en outre une surveillance incessante; peu à peu, l'eau se charge de poussières, la vitesse de circulation de l'eau diminue, ce qui amène des perturbations dans le fonctionnement du dispositif. De temps à autre, on est obligé de renouveler l'eau. C'est pourquoi la compensation hydraulique n'a pas été installée sur les appareils des autres observatoires séismologiques suisses[1].

V. *Compensation du Grand Pendule de Strasbourg.*

1° *Effets de la température.* — J'ai préalablement étudié les effets des variations de la température sur la composante verticale du grand pendule. Leur amplitude journalière est de l'ordre de 0°,1; elle peut, exceptionnellement, atteindre 0°,2. J'ai réalisé artificiellement des variations plus brusques et plus notables en chauffant la salle au moyen d'un radiateur électrique de 600 watts, que j'ai installé successivement en différents points de la pièce. Malheureusement, j'ai bientôt constaté

1. M. Kreis, directeur de l'Observatoire de Coire, a installé sur son appareil un nouveau dispositif, qui n'a encore fait l'objet d'aucune publication.

que, suivant l'orientation du réflecteur, les résultats obtenus étaient complètement différents : le déplacement de la plume se produisait même tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Ce fait doit être attribué à l'inégalité de l'échauffement et à la production des courants de convection provoquant, suivant les cas, une hausse de température plus rapide pour l'un des ressorts que pour les trois autres : d'où modification de l'équilibre du système. Aucune conclusion ne pouvait être tirée de cette première série de mesures.

Pour les études suivantes, je me suis borné à utiliser l'échauffement produit par la lampe électrique située tout près du plafond de la salle, et par la présence de l'observateur. Les inconvénients précédents ont été totalement supprimés, et les phénomènes se sont montrés constants. La hausse de température est d'environ 0°,4 pendant un tour du cylindre enregistreur, c'est-à-dire 18 minutes; quand l'observateur quitte la salle en éteignant la lampe, la baisse est de 0°,4 en 18 minutes avec la même régularité. Des variations de température de cet ordre sont suffisamment importantes pour qu'il soit aisé d'en étudier les effets.

D'après la formule (50), on trouve que pour une hausse de température de 1°, la masse s'abaissera de 0 mm. 06 (la période de l'appareil étant égale à 1ˢ,0). Ce déplacement correspondrait, pour un agrandissement de 1200, à une déviation de la plume égale à 7 cm. par degré. La dilatation des tiges de liaison agit en sens inverse : elle correspond à une déviation d'environ 4 cm. par degré; la déviation résultante est finalement d'environ 3 cm. pour un degré. Ce calcul ne tient pas compte de l'effet des liaisons élastiques qui ne peut être évalué. On s'explique donc qu'il y ait un certain écart avec l'observation : effectivement, la déviation mesurée est d'environ 2 cm.

A titre de comparaison, j'ai procédé aux mêmes opérations pour le vertical Wiechert de 1200 kgs (période 3ˢ,5, agrandissement 180) : la déviation de la plume est de 12 mm. par degré. Sa sensibilité aux variations de température n'est donc pas très inférieure à celle du grand pendule, malgré la différence des dimensions des deux appareils, et malgré l'installation sur le

Wiechert du dispositif de compensation décrit plus haut (voir p. 97). J'ai toutefois tenté, sinon de supprimer complètement, tout au moins de réduire l'importance des effets thermiques sur la composante verticale du grand pendule.

2° *Principe.* — Le principe consiste, comme pour le vertical Wiechert, à obtenir le déplacement du point d'appui d'un des leviers. Pour atteindre ce résultat, j'ai utilisé la variation du coefficient d'élasticité d'un ressort avec la température.

J'ai indiqué plus haut (voir p. 29) les raisons pour lesquelles le point d'appui du premier levier doit rester absolument fixe; c'est pourquoi on ne peut agir que sur celui du deuxième levier. Il faut le déplacer d'une quantité proportionnelle aux variations de température et dans un sens tel que le levier ne subisse aucune rotation quand la température varie. Cette quantité est facile à déduire des nombres indiqués plus haut sachant que l'amplification du premier levier est égale à 10[1].

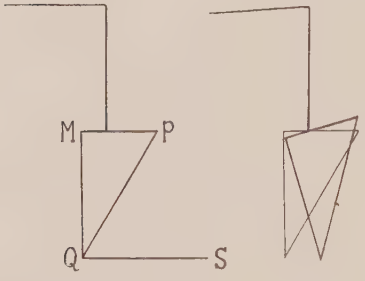


Fig. 41.

D'autre part, les variations de longueur d'un ressort tendu de dimensions pratiques sont assez petites : il est donc nécessaire de les amplifier au moyen d'un levier. La plaquette sur laquelle le deuxième levier prend son point d'appui est fixée en B au levier OB, mobile autour de l'axe de rotation O, et maintenu par le ressort RA, dont la tension est $F = \beta l$, β étant le coefficient d'élasticité, et l l'allongement à la température initiale. Pour une hausse de température de 1° on aura :

$$F = (\beta - \Delta\beta)(l + \Delta l) \qquad (84)$$

1. Il en résultera une légère inclinaison de la tige QS, sans importance, étant donné la petitesse des déplacements considérés.

le coefficient d'élasticité du ressort diminuant de $\Delta\beta$ et son allongement augmentant de Δl. D'où :

$$\Delta l = l\frac{\Delta\beta}{\beta} = l\frac{\Delta\mu}{\mu} = l\varepsilon\,, \qquad (85)$$

μ étant le module de Coulomb du ressort, et ε son coefficient thermo-élastique. Le déplacement correspondant du point B sera multiplié par le rapport $\frac{OB}{OA}$. Les éléments doivent être choisis de façon à donner à ce déplacement une valeur telle que

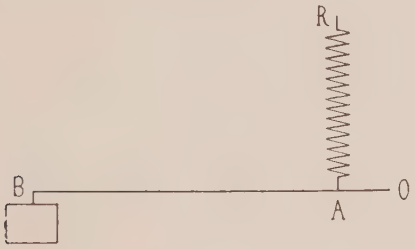


Fig. 42.

la droite MP reste horizontale. Connaissant le coefficient thermo-élastique ε, on peut fixer OB, OA et l de manière à obtenir le résultat cherché.

3° *Installation.* — Le dispositif comprend d'abord une sorte de potence CDEF, fixée au pilier de ciment armé S au moyen de vis V scellées dans la maçonnerie. Cette pièce comporte 4 épaulements *a*, soudés à l'autogène, sur lesquels sont fixées deux paires de lamelles d'acier *l*, croisées, qui déterminent l'axe de rotation O du levier. Celui-ci possède également 4 épaulements *a* analogues, servant de même à la fixation des lamelles. Il est constitué par des cornières d'acier assemblées avec des fers plats par des rivets; on lui a donné une forme triangulaire, de manière à constituer un ensemble suffisamment rigide et pas trop lourd. Le ressort R est fixé d'une part à la potence, de l'autre au levier, par l'intermédiaire de tiges filetées *b* mu-

nies chacune d'un écrou moleté c permettant le réglage de la tension. L'extrémité gauche du levier agit sur la plaque p supportant le point d'appui du deuxième levier (consulter les figures d'ensemble 12, 13 et 14) par l'intermédiaire d'une tige filetée HB comprenant une partie amincie pour permettre le jeu de la pièce. La plaque est constituée par un chariot en bronze se mouvant à frottement doux entre deux glissières q,

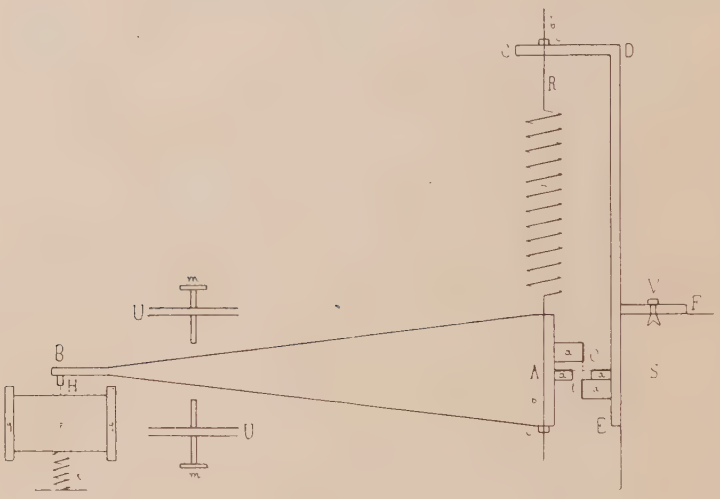


Fig. 43.

destinées à empêcher de brusques déplacements, soit latéraux, soit antéro-postérieurs, qui pourraient occasionner des accidents.

Afin de faciliter la mise en place et le réglage, on a installé un dispositif de blocage du levier, constitué par de grosses vis m à tête moletée, traversant des fers plats U, solidement vissés aux poutrelles du bâti.

Le ressort choisi est l'ancien ressort de l'appareil vertical Galitzine[1] (resté disponible depuis son remplacement par le ressort en élinvar). Ses caractéristiques sont : longueur à vide :

1. 9, p. 247.

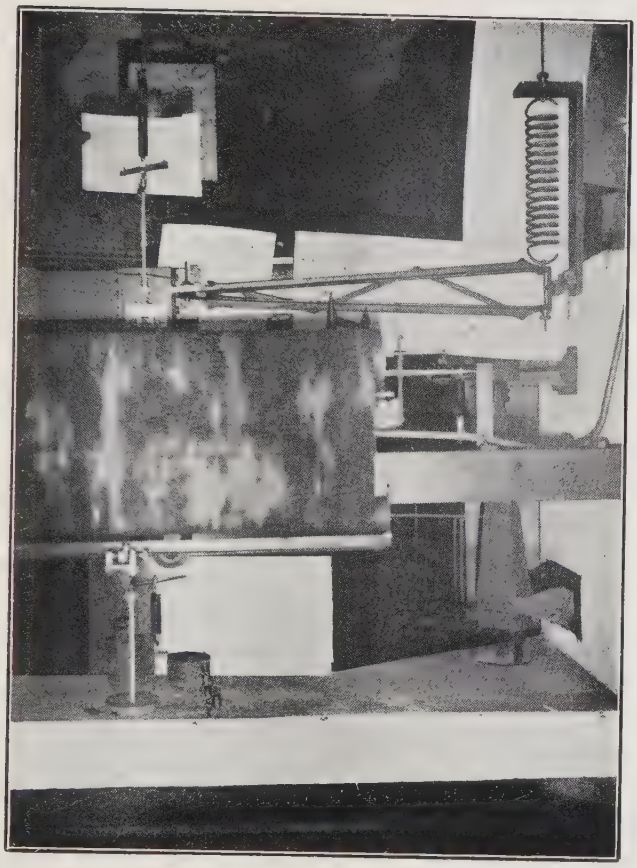


Fig. 44.

17 cm., diamètre du fil : 6 mm., diamètre du boudin : 74 mm., nombre de spires : 15, coefficient thermo-élastique : 240×10^{-6}.

Si on admet une fatigue maximum du métal de 30 kgs. par mm^2, la charge limite qu'on pourra imposer au ressort sera de 40 kgs. Les dimensions de la potence ont été fixées de manière que cette charge ne puisse être dépassée. Le rapport $\frac{OB}{OA} = 25$. Pour obtenir un déplacement du point B égal à 0 mm. 2, correspondant à une hausse de température de 1°, il faudrait, d'après la formule (85), tendre le ressort de manière à lui donner un allongement initial égal à 3 cm. 3.

4° *Étude du dispositif.* — Le poids de l'ensemble constitué par le chariot, le deuxième levier et ses masses additionnelles est supporté : 1° par les ressorts du dispositif d'augmentation de période, 2° par le ressort de compensation. Par suite de la forme compliquée des pièces, il n'était pas possible de déterminer à l'avance la répartition des charges entre ces divers ressorts ; on ne pouvait donc savoir quelle tension il faudrait donner au ressort de compensation.

L'appareil étant en ordre de marche, la plume étant au zéro, il faut que lorsqu'on accroche le chariot au levier de compensation en serrant les écrous de fixation de la tige BH, ce levier reste sensiblement horizontal. En tendant le ressort, même jusqu'à sa charge limite prévue de 40 kgs., je ne suis pas parvenu à obtenir ce résultat : le levier venait buter contre la vis inférieure de blocage *m*. Pour réaliser l'équilibre, il aurait fallu pouvoir tendre davantage le ressort.

Ne voulant ni faire l'acquisition d'un ressort pouvant supporter de plus fortes tractions, ni modifier les bras de levier (ce qui aurait nécessité la réfection du levier de compensation et de la potence), j'ai cherché un artifice qui me permît d'atteindre l'équilibre.

Le plus simple aurait été d'installer un contre-poids à l'arrière du levier : vu le manque de place, ce procédé eût été très difficilement réalisable.

Dans une première série d'expériences, j'ai introduit un levier

supplémentaire BL fixé d'une part au levier de compensation par une tige GI, comportant comme la tige BH une partie amincie pour permettre le jeu des pièces, d'autre part au bâti en K par une lamelle flexible KL en acier permettant la rotation du levier. La lamelle KL supportait une partie de la charge, et l'équilibre pouvait être facilement réalisé. Mais le jeu des parties amincies avait pour effet d'absorber partiellement les variations d'allongement du ressort, et le système fonctionnait avec une grande irrégularité.

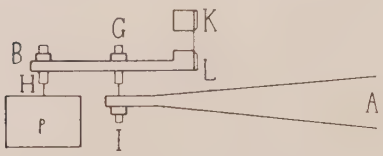


Fig. 45.

J'ai donc rétabli le levier unique, et en-dessous de la plaque *p* (voir *fig.* 43) j'ai installé un ressort de compression *r* qui supporte une partie de la charge. En réglant convenablement cette compression, j'ai obtenu l'équilibre (il est évident que si on modifie notablement la tension du ressort R, on doit changer aussi la tension du ressort *r*).

J'ai cherché ensuite quels étaient les effets des variations de température suivant la tension de R. On constate qu'il vont nettement en décroissant à mesure que l'on tend R, ce qu'indique le tableau ci-dessous :

Allongement de R.	Tension.	Déviation de la plume pour une hausse de 1°.
cm.	kg.	mm.
9	20	15
10	22	14
12	27	12

Je me suis assuré au cours de ces opérations que la période restait égale à 1ˢ,0, et que l'agrandissement restait voisin de 1200 : les résultats sont donc comparables entre eux.

Si on continue à tendre le ressort R, la décroissance se poursuit, mais d'une façon moins régulière : il devient difficile de faire varier simultanément d'une façon continue la tension des différents ressorts, ce qui serait nécessaire pour que la position

d'équilibre restât bien la même. Chaque fois qu'on augmente la tension du ressort de compensation, il faut procéder à de longs et pénibles réglages : c'est pourquoi j'ai dû renoncer à poursuivre cette série de mesures, et me contenter de tendre le ressort à fond (allongement 18 cm., charge 40 kgs). J'ai réglé de façon à obtenir la déviation minimum dans ces conditions et exécuté de nombreuses mesures; je suis parvenu à une déviation moyenne d'environ 9 mm. par degré. Ce résultat, bien qu'imparfait, est toutefois satisfaisant, les variations journalières de température observées dans la salle ne dépassant jamais 0°,2.

RÉSUMÉ

La première partie de ce travail est relative à l'historique des séismographes verticaux : j'ai mis en évidence les différentes idées qui ont présidé à leur construction. J'ai montré par quelle évolution les auteurs ont été amenés à établir les types les plus récents : d'une part, appareils légers à inscription galvanométrique, d'autre part, instruments à inscription mécanique directe sur noir de fumée nécessitant l'emploi de lourdes masses. Parmi ces derniers figure le grand pendule de 19 tonnes de la station séismologique de Strasbourg, qui inscrit à la fois les mouvements horizontaux et les verticaux : j'ai exposé les recherches nécessitées par l'installation de la composante verticale.

Dans le chapitre suivant, j'ai étudié particulièrement le dispositif d'augmentation de période, au point de vue théorique et au point de vue expérimental, en exécutant mes mesures d'abord sur le séismographe vertical Wiechert de 1200 kgr., puis sur le grand pendule de Strasbourg. J'ai montré comment on pouvait réaliser cette augmentation de période. Si l'accord entre la théorie et les résultats des mesures expérimentales laisse à désirer, cela tient au fait qu'il n'est pas possible de tenir compte dans le calcul d'une manière quantitative du rôle des organes de transmission et d'amplification, qui se comportent comme de véritables pendules supplémentaires, en liaison étroite avec le pendule principal. Mais les considérations théoriques sont un guide sûr dans la voie à suivre, et permettent d'atteindre des résultats satisfaisants : c'est ainsi que la période de la composante verticale du grand pendule de Strasbourg a pu être portée de $0^s,2$ à $1^s,0$.

La grande sensibilité des séismographes verticaux aux influences thermiques n'étant pas étudiée, à ma connaissance, dans les mémoires existants, j'en ai fait un exposé d'ensemble

pour les divers appareils et j'ai obtenu plusieurs vérifications pratiques. Bien que le principal facteur qui entre en jeu soit la variation du coefficient d'élasticité des ressorts avec la température, la dilatation des tiges de liaison n'est pas négligeable sur les grands instruments.

L'agrandissement des appareils Galitzine est fonction de la température, car il dépend du champ des aimants, des résistances électriques des bras de levier, de la constante de torsion du fil de suspension du galvanomètre, etc... La variation relative calculée, atteignant près de 10 °/₀ pour une amplitude de variation annuelle de 14°, est bien de l'ordre de celles que l'on observe dans la pratique, lors de la vérification périodique des constantes instrumentales.

J'ai ensuite passé en revue les diverses méthodes de compensation à grille, à bilames, à eau, etc..., et j'ai résumé les principales applications qui en ont été faites. J'ai exposé pour quelles raisons théoriques il était impossible de compenser exactement l'appareil Galitzine en déplaçant le centre de gravité du pendule, soit par une grille, soit par des bilames : l'expérience a montré d'autre part que l'efficacité des dispositifs employés était limitée. La véritable méthode consiste à utiliser, pour la fabrication des ressorts, de l'élinvar, dont le coefficient thermo élastique est 16 fois plus petit que celui des aciers courants.

Bien que les résultats obtenus à Strasbourg par ce procédé aient été pleinement satisfaisants, l'emploi de l'élinvar n'a pas encore pu être généralisé, cet alliage n'étant pas, jusqu'à maintenant, produit couramment en grandes quantités : d'où la nécessité de faire appel, pour les grands appareils, aux méthodes de compensation signalées plus haut. Chacune d'entre elles présente des avantages et des inconvénients que j'ai discutés au cours de cette étude, et il est assez difficile de décider en faveur de l'une ou de l'autre : les observatoires seront guidés dans leur choix surtout par les dispositions locales et les conditions techniques.

Enfin, j'ai décrit en détail le dispositif installé sur le grand pendule de Strasbourg. Il consiste à déplacer le support du point d'appui d'un des leviers d'une quantité convenable en

utilisant la variation du coefficient d'élasticité d'un ressort avec la température. Si la compensation n'est pas complètement réalisée, une réduction notable a été obtenue (réduction de 20 mm. à 9 mm. par degré). Les variations journalières ne dépassant pas 0°,2, ce résultat peut être considéré comme pratiquement suffisant.

BIBLIOGRAPHIE

ABRÉVIATIONS

Beiträge.....	Gerlands Beiträge zur Geophysik, herausgegeben von V. Conrad u. a., Wien.
C. R. A. S.....	Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris.
Jahr. Schweiz.....	Jahresbericht des Schweizerischen Erdbebendienstes, von A. de Quervain, Zürich.
Phys. Zeit.....	Physikalische Zeitschrift, herausgegeben von P. Debye u. a., Leipzig.
Seism. Soc. Japan...	Transactions of the Seismological Society of Japan, Yokohama.
Publ. Bureau Cent...	Publications du Bureau Central Séismologique International sous la direction de E. Rothé, secrétaire de la Section de Séismologie, Série A, Travaux scientifiques (Paris et Toulouse).

N. B. — Les numéros du texte renvoient aux numéros de la bibliographie.

1. F. Angenheister. — *Angewandte Geophysik*. Leipzig, 1930.
2. J. Auclair et A. Boyer-Guillon. — *Les vibrations des routes et des immeubles au passage des véhicules lourds. Étude expérimentale*. Bulletin de l'Office national des Recherches et Inventions. Paris, 1925.
3. H. Benioff. — *A new vertical seismograph*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 22, n° 2, Stanford University, California, 1932.
4. H. P. Berlage. — *Untersuchung des de Quervain Piccard' schen Seismographen*. Jahr. Schweiz, 1922, Zurich, 1924.

5. H. P. Berlage. — *Handbuch der Geophysik*. Bd. IV, Lfg. 2, Berlin, 1930.

6. H. Bouasse. — *Séismes et Sismographes*.Paris, 1927.

7. H. Bouasse. — *Pendule, Spiral, Diapason*. Paris, 1920.

8. V. Conrad. — *Das seismische Observatorium der Zentralanstalt*. Mitteilungen der Erdbebencommission, Neue Folge, 33, Wien, 1909.

9. Y. Dammann. — *Contribution à l'étude des propriétés élastiques de l'élinvar. Son utilisation dans les séismographes*. Thèses présentées à la Faculté des Sciences de Strasbourg pour obtenir le grade de docteur ès sciences physiques (2e thèse, Paris, 1927).

10. J. Debrach. — *Variation des moments magnétiques au voisinage de la température ordinaire*. Diplôme d'études supérieures, Paris, 1928.

11. E. van Everdingen. — *Einleitung, Seismische Registrierungen in De Bilt, 1922*. Utrecht, 1925.

12. J. A. Ewing. — *A seismometer for vertical motion*. Seism. Soc. Japan, Tokyo, 1881.

13. B. Galitzine. — *Ueber einen neuen Seismographen für die Vertikalkomponente der Bodenbewegung*. C. R. des séances de la Commission sismique permanente, t. IV, l. II, Saint-Pétersbourg, 1911.

14. B Galitzine. — *Vorlesungen über Seismometrie*. (Traduction Hecker, Leipzig, 1914; traduction espagnole, Madrid, 1921.)

15. T. Gray. — *On a seismograph for registering vertical motion*. Seism. Soc. Japan, Tokyo, 1881.

16. L. Gruenmach. — *Ueber neue Methoden und Apparate zur Messung von Erderschütterungen kleinster Perioden*. Phys. Zeit. 10, Leipzig, 1909.

17. B. Gutenberg. — *Sind Galitzin-Pendel für Nahbebenaufzeichnungen verwendbar?* Beiträge 22, Leipzig, 1929.

18. B. Gutenberg. — *Registrierungen mit zwei Galitzinpendeln verschiedener Perioden*. Beiträge 25, Leipzig, 1930.

19. B. Gutenberg. — *Grundlagen der Erdbebenkunde*. Berlin, 1927.

20. F. Hubert. — *Die Registrierung der durch fallende Gewichte erzeugten Bodenschwingungen mit einem zweimillionenfach vergrössernden Wiechertschen Vertikalseismograph*. Zeitschrift fur Geophysik, I, Braunschweig, 1924-25.

21. C. Mainka. — *Ueber Erdbebenwellenmesser*. Zeitschrift fur Feinmechanik, Berlin, 1915.

22. E. Mascart. — *Traité de magnétisme terrestre*. Paris, 1900.

23. C. Maurain et L. Eblé. — *Sismographe à trois composantes à enregistrement photographique*. C. R. A. S., 179, II, Paris, 1924.

24. L. Mintrop. — *Die Erdbebenstation zu Bochum*. Glückauf, 45, I, Essen, 1909.

25. M. Muñoz Lumbier. — *Pendulo horizontal de 17.000 kgr*. Boletin del Instituto geologico, Mexico, 1919.

26. E. Oddone. — *Ricerche teorico-sperimentali sulle vibrazione meccaniche del sottosuolo*. Roma, 1923.

27. A. Prey, C. Mainka, E. Tams. — *Einführung in die Geophysik*. Berlin, 1922.

28. A. de Quervain. — *Der transportabel Seismograph mit drei Komponenten*. Jahr. Schweiz., 1922, Zurich, 1923.

29. A. de Quervain. — *Description du séismographe de 21 tonnes*. Publ. Bureau centr., fasc. 4, Paris, 1927.

30. A. de Quervain et A. Piccard. — *Beschreibung des 21 Tonnen-Seismographen*. Jahr. Schweiz., 1924, Zurich, 1926.

31. G. Reutlinger. — *Eine Ueberprüfung der Theorie des Schwingungsmessers*. Beiträge 24, Leipzig, 1929.

32. E. Rothé et J. Lacoste. — *Le séismographe de 19 tonnes de la station séismologique de Strasbourg*. Publ. Bureau Centr., fasc. 4, Paris, 1927.

33. W. Schlueter. — *Schwingungsart und Weg der Erdbebenwellen*. Beiträge 5, Leipzig, 1901.

34. A. Schmidt. — *Das Trifilargravimeter*. Beiträge 4, Leipzig, 1899.

35. A. Sieberg. — *Erdbebenkunde*. Braunschweig, 1905, réédition Iéna, 1923.

36. O. Somville. — *Sur les appareils séismiques*. Bruxelles, 1907.

37. Dr Straubel et O. Oppenstein. — *Das Vertikalseismometer der seismischen Station zu Jena*. Beiträge 9, Leipzig, 1908.

38. T. Tamaru. — *Ein neues Prinzip des Vertikalseismometers*. Phys. Zeits., 4, Leipzig, 1903.

39. T. Tamaru. — *Ein Makro-Vertikalseismometer*. Zeitschrift für Instrumentenkunde, XXV, Berlin, 1905.

40. G. Vicentini et G. Pacher. — *Microsismografo per la componente verticale*. Bollettino della Societa Sismologica Italiana, 5, Modena, 1899.

41. F. Wenner. — *A new seismometer equipped for electromagnetic damping and electromagnetic and optical magnification*. Bureau of Standards Journal of Research, vol. II, Washington, 1929 May.

42. E. Wiechert. — *Die Institute für Geophysik.* Die physikalischen Institute der Universität Göttingen. Festschrift Leipzig und Berlin, 1906.

43. E. Wiechert. — *Die Erdbebenforschung, ihre Hilfsmittel und ihre Resultate für die Geophysik.* Phys. Zeits., 9, Leipzig, 1908.

44. J. Wilip. — *Ueber die Anwendung der galvanometrischen Registriermethode in seismischen Gebieten.* Beiträge, Leipzig, 1928.

45. J. Wilip. — *Zur Theorie und Konstruktion von Vertikalseismographen.* Beiträge 19, Leipzig, 1928.

46. J. Wilip. — *Acta et Commentationes Universitatis Tartuensis A XX6,* Tartu, 1930.

47. J. Wilip. — *Sitzungsberichte der Naturforscher Gesellschaft,* XXXV, 3-4, Tartu, 1930.

Consulter aussi lès comptes rendus des séances des Conférences de l'Union géodésique et géophysique internationale, Section de Séismologie, rédigés par le secrétaire E. Rothé (Toulouse 1922-25-28-31), où les problèmes relatifs aux séismographes verticaux ont été discutés à diverses reprises.

SUR LES
PHASES DES SÉISMES TRÈS ÉLOIGNÉS
(10000 KM. ET AU DELA)

I. Les phases classiques.
Les courbes de Wiechert et Zoeppritz.

L'étude des diverses phases des tremblements de terre présente d'autant plus d'importance et d'intérêt que la connaissance des ondes séismiques, de leur trajectoire et de leur vitesse constitue le seul moyen qui permette aux physiciens de se faire une idée de la constitution interne de la terre. Ces ondes pénétrant d'autant plus profondément qu'elles proviennent de séismes plus éloignés, on conçoit que seule l'étude des tremblements de terre lointains puisse conduire à la solution des problèmes relatifs aux couches les plus profondes du globe.

Les inscriptions relatives à ces séismes offrent une très grande complexité, à cause des nombreuses phases qui y apparaissent : c'est leur étude qui, dans l'état actuel de nos connaissances, peut faire progresser la séismologie. La détermination des épicentres, sauf quelques rares exceptions (pour certaines régions océaniennes, par exemple), est en général possible et conduit à des résultats satisfaisants, à l'aide des données des stations à distance moyenne : il est naturel que les premières recherches aient porté précisément sur les séismes à distance moyenne, dont les inscriptions présentent une simplicité relative. Les phases y sont, la plupart du temps, en nombre restreint, et elles y apparaissent souvent avec la plus grande netteté.

L'interprétation des séismogrammes progresse en même temps que la théorie de l'élasticité. On sait que l'on a pu définir, avec Poisson, deux groupes d'ondes : les ondes *longitudinales* ou *primaires* (symbole P), et les ondes *transversales* ou *secondaires* (S) ; avec Lamb, Rayleigh, Love, un troisième groupe, complexe, celui des ondes *longues* ou *superficielles* (L).

Les ondes appartenant aux deux premiers groupes peuvent subir à la surface du sol une ou plusieurs réflexions : les phases qui prennent naissance ainsi ont été maintes fois observées sur les séismogrammes; on les désigne en faisant suivre le symbole P ou S de la lettre R, qu'on affecte d'un indice égal au nombre des réflexions (PR_1, PR_2, PR_3,... SR_1, SR_2, SR_3).

Les ondes longitudinales peuvent, après s'être réfléchies à la surface du globe, se transformer en ondes transversales. De même, les ondes transversales peuvent, après réflexion, se transformer en ondes longitudinales, mais sous certaines conditions[1]. Deux cas se présentent :

1° *Les vibrations sont parallèles au plan d'incidence.* — Soient b la vitesse de l'onde transversale incidente, a la vitesse de l'onde longitudinale réfléchie, i l'angle d'incidence, et i_1 l'angle de réflexion. On a :

$$\frac{b}{\sin i} = \frac{a}{\sin i_1}. \qquad \text{Or } b < a.$$

Si $\sin i < \frac{b}{a}$, i_1 est réel, et il y a une onde longitudinale réfléchie.

Si $\sin i > \frac{b}{a} > \sin i_1 > 1$, i_1 est imaginaire, et il n'y a pas d'onde longitudinale réfléchie.

2° *Les vibrations sont perpendiculaires au plan d'incidence.* — Par raison de symétrie, il ne peut y avoir d'onde réfléchie longitudinale.

1. Voir E. Rothé, **23**, pp. 39-40.

La présence d'ondes réfléchies, ayant changé de nature à la réflexion, a été également décelée sur les inscriptions. On les désigne par un groupe de lettres, dont chacune représente, suivant les notations précédentes, un élément de la trajectoire, limité d'une part par un point de réflexion, d'autre part par un autre point de réflexion, par l'épicentre ou par la station (PS, PPS, SPS, etc...). Cette notation est parfois appliquée aux ondes réfléchies n'ayant pas changé de nature à la réflexion (PP, PPP, SS, SSS, etc...), mais on conserve plus généralement les symboles PR_1, PR_2, etc...

Les premiers séismologues se sont préoccupés de tracer des courbes représentatives des durées de propagation des ondes séismiques. En 1903, J. Milne a tracé une courbe des P; d'autres furent établies plus tard, à l'aide d'observations plus nombreuses, par Benndorf, Oldham, Kövesligethy. En 1906, Wiechert et Zöppritz[1], partant des données de trois séismes dont l'épicentre était particulièrement bien connu, ont tracé des courbes, non seulement pour les P, mais aussi pour les S, les PR_1, PR_2, PR_3, les SR_1, SR_2, SR_3, les PS, et les L pour des distances épicentrales comprises entre 0 et 13000 km.

II. Les surfaces de discontinuité.

L'examen des anomalies que présentent les courbes a conduit à admettre l'existence hypothétique, à l'intérieur de la terre, d'un certain nombre de *surfaces de discontinuité*, au passage desquelles les propriétés physiques se modifient, sinon brusquement, du moins très rapidement. J'en distingue huit principales, dans le tableau ci-dessous qui rassemble les résultats obtenus par les auteurs, dont les noms figurent en tête de chaque colonne (les numéros renvoient à la bibliographie). Les profondeurs, exprimées en kilomètres, sont comptées à partir de la surface du globe.

1. Ueber Erdbebenwellen, 32.

A. MOHOROVIČIĆ 14	S. MOHOROVIČIĆ 19, p. 193	GALITZINE 3, p. 323	WIECHERT ET ZÖPPRITZ 32, p. 99	GEIGER ET GÜTENBERG 4, p. 675
50	60	»	»	»
»	120	106	»	»
»	»	232	»	»
»	400	492	»	»
»	»	1442	1500	1200
»	2000	»	»	1700
»	2500	»	»	2500
»	»	»	»	2900

La première surface, à 50 km., pourrait correspondre à la surface de séparation entre l'écorce rocheuse (sial-sima) et le magma ; son existence paraît probable, étant donnés les résultats obtenus dans l'étude des séismes voisins, grâce aux tables de Mohorivičić[1], fondées sur cette hypothèse.

Toutes les autres surfaces, de la deuxième à la septième, sont plus hypothétiques encore : existent-elles réellement, et d'une manière aussi géométrique? On peut, en tout cas, affirmer que, même si elles sont fictives, ou si les profondeurs indiquées ne sont pas exactes, leur considération a permis des interprétations intéressantes, et guidé les progrès de la séismologie moderne.

Au passage de la huitième surface qui sépare les couches supérieures du *noyau central*[2], le changement des propriétés physiques serait, selon Gütenberg[3], très brusque : la vitesse des ondes longitudinales tomberait de 13 à 8,5 km./s. quand elles pénètrent dans le noyau, pour croître ensuite jusque vers 11 km./s., quand elles parviennent au voisinage du centre de la terre. Les autres couches seraient beaucoup moins nettement séparées entre elles qu'elles ne le sont du noyau : sur la

1. **14** et **15**, voir aussi E. Rothé, **21**, pp. 17-19.

2. Les physiciens allemands désignent sous le nom global de « *Mantel* » l'ensemble des couches qui entourent le noyau.

3. **5**, p. 52.

surface de ce dernier peuvent se produire des réflexions et des réfractions donnant naissance à de nouvelles phases sur lesquelles je reviendrai plus loin. La profondeur assignée au noyau est d'environ 2900 km.[1]

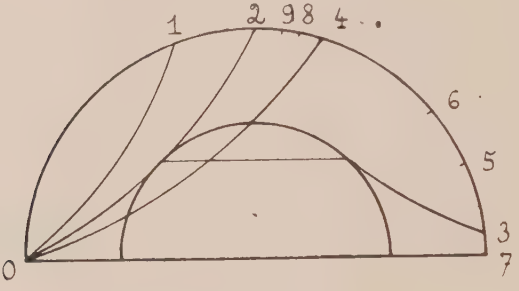
III. — Tables et courbes pour les distances éloignées. Phases réfléchies ou réfractées sur la surface du noyau.

Pour des distances n'excédant pas 1000 km., on utilise de préférence les tables de A. Mohorovičić[2]; les courbes de Wiechert et Zöppritz ont rendu et rendent encore de grands services jusque vers 9000 km. Les données comprises entre 9000 et 13000 km., provenant d'extrapolations, ne conduisent qu'à des résultats défectueux; d'autre part, les courbes s'arrêtent à 13000 km. : il était donc indispensable de rectifier et de compléter les résultats de Wiechert et Zöppritz. Parmi les nombreux auteurs qui se sont voués à cette tâche, je ne citerai que ceux dont les travaux me semblent fondamentaux.

Turner[3] a établi une formule empirique réunissant d'une façon satisfaisante les données relatives à des séismes bien connus; après quoi, il a extrapolé pour les grandes distances. Dans « The large earthquakes (1913) », il a publié une table des durées de propagation des P et des S allant jusqu'à 150°; cet auteur a ensuite étudié les inscriptions relatives à des séismes voisins de l'antipode. La courbe des durées de propagation de la 1re phase enregistrée pour ces distances ne se raccorde pas avec celle des P précédemment obtenue. Sans faire d'hypothèse sur la nature de cette 1re phase, Turner l'a désignée par un symbole nouveau [P] (1923). Il lui a fait correspondre une formule empirique, et a étendu de la sorte la table des [P] de 130° à 180°.[4]

1. **4**, p. 675.
2. **14** et **15**.
3. **27**.
4. **26**.

Gütenberg[1] a publié en 1914 un mémoire relatif à la propagation des ondes, et en particulier de celles qui se sont réfléchies ou réfractées sur la surface du noyau. Les nouvelles phases introduites ainsi sont désignées suivant le même principe que les phases classiques ; à chaque tronçon de la trajectoire limité par un point de réflexion ou de réfraction à la surface du noyau et un point à la surface du globe (épicentre, station, ou point de réflexion), ou un autre point à la surface du noyau, correspond une lettre, P ou S. Mais, après chaque réflexion ou ré-



fraction à la surface du noyau, on ajoute l'indice *c* à la lettre représentant le précédent élément de la trajectoire[2]. Par exemple, la phase S_cP_cS désigne une onde qui, partie transversale de l'épicentre, devient longitudinale en se réfractant dans le noyau, puis redevient transversale après réfraction dans les couches supérieures.

Voici comment Gütenberg rend compte des différentes sortes de trajets que peuvent suivre les ondes longitudinales issues d'un épicentre O; les rayons sont supposés partir du foyer d'abord horizontalement, puis on fait croître progressivement leur inclinaison initiale, jusqu'à atteindre la verticale.

1. 5.

2. Gütenberg a d'abord utilisé l'indice 4 pour montrer qu'il s'agissait de la 4e des surfaces de discontinuité qu'il distinguait. Le nombre de ces surfaces étant douteux, il a préféré ultérieurement remplacer le chiffre 4 par la lettre *c*, initiale du mot latin *cor* (cœur).

1° Le rayon O_1 est tout entier dans les couches supérieures (trajet direct, ondes P normales).

2° Le rayon O_2, tangent au noyau, se scinde en deux branches, dont l'une suit le trajet continu O_2 et dont l'autre, après s'être réfractée dans le noyau, vient aboutir en 3.

3° Le point d'arrivée des ondes suivantes rétrograde ensuite en 5, puis en 6, jusqu'à un point 4. Cela résulte de l'hypothèse faite par l'auteur d'une brusque diminution de la vitesse des ondes lorsqu'elles pénètrent dans le noyau. Si l'on admettait que cette vitesse reste constante, ou qu'elle augmente brusquement, ou qu'elle subit une variation progressive, les calculs conduiraient à des résultats très différents : la rétrogradation prévue par Gütenberg n'existerait plus.

La trajectoire des ondes, à l'intérieur du noyau, possède une certaine inclinaison par rapport à la verticale passant par l'épicentre (O_7). Cette inclinaison augmente depuis le rayon O_3 jusqu'au rayon O_4.

4° La zone 2-4 est une *zone d'ombre* : il n'y parvient (en 8 et en 9, par exemple) qu'une quantité insignifiante d'énergie. La plus grande partie est transformée en ondes superficielles se propageant à la surface du noyau.

5° Le point 4 est un *foyer* (Brennpunkt). L'inclinaison de la trajectoire dans le noyau passe par un maximum pour le rayon O_4, elle décroît ensuite, et les extrémités des rayons suivants se rapprochent du point 7. La zone 4-7 est appelée par Gütenberg *zone focale*. Entre 3 et 4, à chaque distance correspondront deux trajectoires d'ondes longitudinales qui parviendront l'une après l'autre, car elles ont parcouru des chemins différents. Le point 4 est situé à 16000 km. de O ; il doit correspondre à un maximum pour les ondes longitudinales.

D'après les notations indiquées plus haut, ces ondes devraient être désignées par le symbole P_cP_cP : on écrit plus simplement P′ ; les deux groupes prévus seront appelés P'_1 et P'_2. Il y a identité entre les P′ et les [P] de Turner.

Gütenberg admettant d'autre part que les ondes transversales peuvent traverser le noyau, les ondes S directes disparaîtront

à une certaine distance; il devra y avoir également des ondes $S_c S_c S$, ou S', qui de même se diviseront en S'_1 et S'_2.

L'auteur distingue en outre des ondes $S_c S$, $P_c P$ qui se sont simplement réfléchies une fois sur le noyau. Par réfraction avec changement de nature à la surface de séparation prendront naissance des ondes $S_c P_c S$, $S_c P_c P$, $P_c S_c P$, etc... Les ondes $P_c P_c P_c P$ se sont réfractées deux fois sur la surface de séparation et se sont réfléchies une fois sur cette dernière. Plus tard, Gütenberg a distingué[1] encore les $PS_c P_c S$, comportant une réflexion à la surface du globe, et les $S_c P_c P_c S$, comportant une réflexion à la surface du noyau. D'autres phases ont été encore introduites, que je laisse de côté à cause de leur moindre importance.

L'auteur a tracé des courbes représentatives pour ces diverses phases, en réunissant, d'une part, des résultats d'observation, et de l'autre, se laissant guider par des considérations théoriques. Le degré de certitude de chacune d'elles est donc assez variable.

Depuis, de nombreuses tables ont été dressées, et de nouvelles courbes ont été tracées, soit à l'occasion d'études particulières, soit à la suite de travaux d'ensemble. Je citerai celles de Klotz[2], de Visser[3], de S. Mohorovičić[4], de Byerly[5], de Jeffreys[6], et de Macelwane[7].

Il serait vain de chercher à établir quelles sont les meilleures d'entre elles : telles tables s'adaptant à merveille à un tremblement de terre donné seront tout à fait discordantes pour un autre. En réalité, à chaque séisme correspond son réseau de courbes : cela tient à l'influence de la profondeur du foyer, et probablement aussi de causes locales : hétérogénéités possibles en certains points, etc...

1. **8**, p. 226 et **9**, p. 151
2. **11**, p. 25.
3. **29**, p. 22 et 76, et **30**, p. 31.
4. **19**, p. 193.
5. **2**, p. 106.
6. **10**.
7. **13**.

Pour exécuter ce travail, j'ai choisi les tables de Macelwane parce qu'actuellement elles sont parmi les plus commodes que nous ayons entre les mains. L'auteur donne les indications suivantes sur leur élaboration :

1° Les P et les S proviennent des tables de S. Mohorovičić.

2° Les PR_1, PR_2, SR_1, SR_2, ont été « ajustées » d'après Gütenberg.

3° Les PR_3 et SR_3 s'écartent peu des données de Wiechert et Zöppritz.

4° Les P', S_cP_cS, et autres ondes réfractées ou réfléchies sur la surface du noyau proviennent des observations de l'auteur et de ses collaborateurs, jointes aux données de Gütenberg.

5° D'autres phases, que je laisserai de côté, figurent encore dans les tables : leurs durées de propagation sont tirées des observations personnelles de l'auteur, jointes, le cas échéant, à celles de Gütenberg.

Macelwane distingue un total de 39 phases : pour la définition de celles que je n'ai pas mentionnées, je renvoie aux travaux déjà cités.

D'autre part, des recherches récentes ont amené certains auteurs à envisager l'existence de nouvelles phases. Déjà, en 1924, H. P. Berlage[1] avait fait l'hypothèse que les ondes longitudinales peuvent parvenir à la station, après s'être réfléchies au voisinage de l'épicentre : sur l'identification de cette phase, il avait basé une méthode de détermination de la profondeur du foyer. F. J. Scrase[2] a étendu cette hypothèse aux ondes transversales directes et aux ondes réfléchies (longitudinales, transversales, ou mixtes). D'autres auteurs[3] ont également étudié cette question, que je laisserai de côté dans ce travail, me réservant d'y revenir ultérieurement.

1. **1**, p. 5.
2. **24**.
3. **20** et **25**.

IV. — Observations faites sur les inscriptions des séismes très éloignés (10000 km. et au delà) obtenues à Strasbourg.

J'ai précédemment noté l'importance de l'étude des séismes éloignés au point de vue de la connaissance des couches les plus profondes du globe. Les ondes réfléchies sur le noyau (P_cP, S_cS) peuvent apparaître pour des distances moyennes, mais elles ne sont ni assez nettes, ni assez régulières pour conduire à des résultats probants. Les S_cP_cS font leur apparition vers 8500 km. environ, et pour des distances comprises entre 8500 et 10000 km. les séismogrammes présentent, dans un intervalle de temps assez restreint, une succession de phases (S_cP_cS, $S_cP_cP_cS$, S, PS), ce qui pendant longtemps a conduit à des interprétations erronées. Les données se rapportant à ces distances sont très nombreuses; elles ont déjà permis plusieurs études : c'est pourquoi je les ai laissées de côté pour borner mes recherches aux inscriptions des séismes distants de 10000 km. et au delà.

Ces dernières sont beaucoup moins nombreuses, et pour avoir des documents en quantité suffisante, j'ai repris les tremblements de terre inscrits à Strasbourg depuis le 1er janvier 1922 jusqu'au 1er octobre 1928. Les coordonnées de l'épicentre, les distances à chaque station et l'heure origine ont été déterminées d'abord par Turner, puis par J. J. Shaw et publiées dans l'*International Summary*. A l'aide des distances indiquées, j'ai procédé à une nouvelle interprétation des séismogrammes, et j'ai pu identifier les phases avec quelques-unes de celles des tables Macelwane, en notant leur degré de netteté, et en marquant celles qui sont les plus importantes et qui servent de base à cette nouvelle analyse. Dans la période indiquée, j'ai retenu 44 séismes dont les distances épicentrales sont supérieures ou au moins égales à 10000 km., en laissant de côté ceux dont les phases sont peu nettes, et qui, par suite, ne peuvent être interprétés de façon certaine. J'ai utilisé principalement les inscriptions des appareils Galitzine, en y joignant, dans le cas de séismes importants, celles des appareils Wie-

chert. C'est presque toujours sur la composante verticale Galitzine qu'on trouve les phases les plus nettes.

Il est à remarquer que les inscriptions d'importance moyenne, et certaines même peu importantes, donnent en général des résultats plus clairs que celles des catastrophes, où les phases principales sont souvent troublées par des phénomènes accessoires. Sur certains séismogrammes, on voit parfois plusieurs impulsions très vives, séparées par un trait à peine ondulé : de tels documents sont particulièrement précieux pour cette étude.

Il est à peine besoin d'ajouter que les 39 phases dont il a été fait mention plus haut ne sont pas décelables sur un même séismogramme; nombreuses même sont celles que je n'ai pu distinguer d'une façon nette, certaines ont été identifiées d'une manière trop intermittente pour qu'il soit permis d'en tirer une conclusion. Les résultats que je donnerai plus loin se rapporteront donc exclusivement aux phases que j'ai pu noter d'une façon suffisamment fréquente et suffisamment certaine.

Dans cette étude, je laisserai de côté les ondes superficielles (ondes de Love, ondes de Rayleigh, ondes dites W ayant fait le tour de la terre), pour m'occuper exclusivement des ondes longitudinales et transversales, directes, réfléchies, réfractées ou complexes.

De 10000 à 14000 km., les données sont assez nombreuses; au delà, elles deviennent plus rares (15 séismes sur les 44 étudiés), ce qui apporte un certain élément d'incertitude dans les conclusions. Il sera donc utile de reprendre et de compléter ce travail à l'aide de nouveaux documents, au fur et à mesure que paraîtront les fascicules ultérieurs de l'*International Summary*. Il sera également nécessaire d'effectuer des recherches analogues avec des matériaux provenant d'autres observatoires, afin d'éliminer l'effet des conditions locales. De plus, la période des appareils Galitzine de Strasbourg est encore actuellement de 12^{s} pour les trois composantes : il est clair que si l'on donnait aux pendules une période de 25^{s} (comme cela a lieu dans d'autres observatoires), les conclusions pourraient être légèrement modifiées, la sensibilité des appareils relativement aux diverses périodes n'étant pas la même.

A) *Résultats des observations.*

Le tableau I donne la liste, par ordre de date, des séismes étudiés, avec les heures de début à Strasbourg et les données extraites de l'*International Summary* : heures origine, coordonnées des épicentres, et distances. Ces dernières, exprimées en degrés et en dixièmes de degrés dans l'*International Summary* ont été transformées en kilomètres, comme dans les tables de Macelwane, en admettant $1° = 111$ km. 11 ; je n'ai pas jugé nécessaire d'arrondir les nombres trouvés, mais il semble qu'au delà de 10000 km. on ne puisse compter sur une erreur absolue inférieure à 50 km.

Dans le tableau II, les tremblements de terre ont été classés par ordre de distance croissante (les numéros d'ordre indiqués dans la première colonne de ce tableau ont été reproduits dans la dernière colonne du tableau I) : les caractéristiques des principales phases y sont consignées ; on a indiqué en lettres italiques celles des phases qui sont les plus nettes, et sur lesquelles repose l'interprétation de chaque séisme. Les résultats énumérés dans le tableau II peuvent se résumer ainsi :

1° Les ondes P sont très nettes jusque vers 12000 km., exceptionnellement jusque vers 13000, puis deviennent faibles et douteuses, et manquent à partir de 14000.

2° Les P′ manquent jusque vers 11000, puis apparaissent faibles et douteuses ; elles sont très nettes à partir de 14000.

3° Les S_eP_eP apparaissent très nettement vers 15000 ; après, elles se montrent irrégulières, tantôt faibles, tantôt nettes.

4° Les PR_1, irrégulières jusqu'à 10500, apparaissent très nettement jusqu'à 14500 et au delà sont de nouveau irrégulières. Vers 16500, les courbes des PR_1 et des S_eP_eP se coupent ; la superposition de ces deux phases doit donner naissance à une importante impulsion : c'est bien ce que j'ai constaté pour le séisme n° 34.

5° Les S_eP_eS et les $S_eP_eP_eS$ se montrent tout à fait irrégulières ; tantôt elles sont nettes, tantôt elles sont douteuses, quelle que soit la distance.

6° Les S sont très nettes jusqu'à 10500, puis elles faiblissent, et disparaissent vers 11000.

7° Les PS, faibles jusqu'à 10500, sont nettes jusqu'à 11500, puis irrégulières au delà.

8° Les PPS et les SR_1 sont irrégulières.

9° Les autres phases n'apparaissent qu'avec la plus grande irrégularité.

10° Pour des distances inférieures à 17000, on trouve fréquemment sur les séismogrammes des impulsions très nettes qui ne correspondent à aucune phase des tables; *on en trouve toujours pour les distances supérieures.*

B) *Conclusions au point de vue de l'interprétation.*

Les conclusions que l'on peut tirer de ces résultats au point de vue de l'interprétation des séismogrammes sont les suivantes :

1° De 10000 à 10500 km., la méthode classique de détermination de la distance par la différence S — P reste la meilleure (à condition d'utiliser les tables de Macelwane, à l'exclusion de celles de Wiechert et Zöppritz, qui conduisent à des résultats incorrects).

2° De 10500 à 12000, il faudra avoir recours à la différence PR_1 — P.

3° De 12000 à 14000, la première phase nette est PR_1, P et P' étant faibles ou manquant. La deuxième phase nette est PS ou PPS. Entre deux interprétations possibles, il faudra choisir celle qui s'accorde le mieux avec les autres phases.

4° De 14000 à 17000, la première phase nette est P', la deuxième S_eP_eP ou PR_1, la troisième PS ou PPS; il y aura à faire un choix entre plusieurs interprétations possibles.

5° A partir de 17000, une complication se produit du fait de l'apparition de plusieurs impulsions, généralement très nettes, ne correspondant à aucune phase des tables; on en trouve une entre P' et PR_1, une autre entre PR_2 et PR_3, etc... La première d'entre elles a déjà été signalée par Gutenberg : je reviendrai plus loin sur ce point. La première phase nette est en général P', la troisième étant S_eP_eP ou PR_1.

6° Tout ce qui vient d'être dit suppose que la phase P ou P′ a été bien inscrite sur les séismogrammes ; ce n'est pas toujours le cas. Il peut arriver que les ondes P ou P′ soient faibles ou incertaines : il faut donc examiner avec grand soin le début des inscriptions. Une impulsion très nette, précédée d'émergences douteuses, correspond en général à PR_1 (ou S_cP_cP, au delà de 16500 kms.). En ce cas, l'examen des autres phases inscrites doit permettre d'arriver à une analyse satisfaisante. Mais si les P ou les P′ manquent complètement, il devient très difficile d'éviter les erreurs d'interprétation : rien ne permet, a priori, d'affirmer qu'une inscription débute par les PR_1 et non par les P ou P′; l'étude des autres phases ne peut pas toujours tirer d'embarras.

Il est donc très important de posséder des appareils ayant une grande sensibilité pour les premières phases : la composante verticale Galitzine est particulièrement précieuse, car elle inscrit souvent les phases P ou P′, alors que ces dernières manquent sur tous les autres appareils, même sur les horizontaux Galitzine. Une station qui ne pourrait assurer le fonctionnement continu des trois composantes Galitzine devrait donc, pour l'étude des séismes éloignés, laisser toujours en marche au moins la composante verticale.

C) *Comparaison entre les durées de propagation des tables de Macelwane et les résultats de l'observation.*

D'après les distances, et les heures origine indiquées dans l'*International Summary*, et d'après les durées de propagation des tables de Macelwane, j'ai calculé les heures d'arrivée des principales phases : j'en ai déduit la différence O — C entre les heures observées sur les séismogrammes et les heures calculées. Le tableau III rassemble les résultats obtenus ainsi pour les phases P, P′, PR_1, PR_2, PR_3, S, PS, PPS, SR_1 ; j'y ai joint, pour quelques séismes très éloignés, les résultats relatifs aux PR_4. Les durées de propagations relatives aux S_cP_cP, S_cP_cS, $S_cP_cP_cS$ n'étant données dans les tables qu'à 1/10 de minute près, les différences n'ont pas été calculées pour ces phases.

Pour les autres, les résultats étaient trop peu nombreux pour qu'il pût en être fait état. Ce tableau conduit aux remarques suivantes :

1° Pour trois séismes (N^{os} 4, 13, 36) on trouve de grandes différences O — C : elles sont supérieures à 20^{s}. Sans être les mêmes pour toutes les phases, ces écarts sont tels qu'en retranchant une même quantité des valeurs correspondant aux différentes ondes, on améliorerait beaucoup les résultats. Le fait pourrait être attribué à une erreur dans la détermination de l'heure origine.

2° La valeur O — C peut varier beaucoup d'une phase à l'autre d'un même séisme, et d'une façon très irrégulière; elle peut atteindre 15^{s} et même plus pour des phases très nettes et bien déterminées. En déplaçant légèrement l'épicentre, suivant une méthode fréquemment utilisée dans les observatoires, on pourrait dans certains cas améliorer un peu les résultats, mais dans une faible mesure.

3° Les écarts sont généralement plus petits pour les impulsions du début que pour les phases plus éloignées : cela tient sans doute à ce que la complexité d'un séismogramme croît depuis le début jusqu'à l'apparition des maximums. Des phénomènes accessoires peuvent se produire, et apporter en bien des cas des pertubations ; des ondes superficielles peuvent prendre naissance, et venir interférer avec les ondes longitudinales et transversales.

4° On peut en conclure qu'il est illusoire, pour des tremblements de terre à des distances de 10000 kms. et plus, de compter celles-ci par 1/10^{e} de degré : une précision de 1/2 degré est déjà suffisante, et dans bien des cas elle ne sera pas atteinte.

5° On se rend compte aussi qu'il serait superflu de discuter sur la valeur respective des diverses tables pour de telles distances, alors que les durées de propagation des unes et des autres ne diffèrent que de quantités en général inférieures à la moyenne des différences O — C du tableau III.

V. — Comparaison des résultats obtenus avec ceux de Gütenberg et de Macelwane.

A) *Les phases observées.*

1° *Les P et les S.* D'après Gütenberg[1] les P doivent disparaître au moment où leur trajectoire devient tangente au noyau : déterminer le moment de cette disparition est assez malaisé. Macelwane[2] a cru trouver des P jusque vers 18000 kms. : d'après lui, les P qui auraient été ainsi reconnues dans la zone d'ombre proviendraient de l'énergie dispersée à la surface du noyau et réfractée à travers les couches supérieures. Avant de discuter le bien fondé de cette explication. il convient même de se demander si les observations de l'auteur sont suffisamment probantes. Sur les reproductions photographiques qu'il a jointes à l'appui de son mémoire, on ne distingue que des traces très faibles d'origine peu certaine, et l'on peut exprimer quelques doutes sur ses conclusions.

Dans mes observations, j'ai trouvé des P très nettes jusque vers 12000 kms. (exceptionnellement vers 13000) ; au delà, rien de certain. Les S sont très nettes jusque vers 10500 et disparaissent vers 11000. Il y a là, entre les P et les S, une divergence qui s'explique aisément par une plus faible valeur de la vitesse, et par une plus grande incurvation de la trajectoire des ondes S.

D'après ces remarques, il semble bien que si de l'énergie est dispersée sous forme d'ondes longitudinales dans la zone d'ombre, ce soit dans une proportion très faible, et pratiquement négligeable dans les conditions de précision des mesures.

2° *Les P'.* Selon la théorie de Gütenberg[3], à partir de 16000 kms. deux groupes d'ondes P' arrivent à la station après avoir suivi un trajet différent, avec des durées de propa-

1. **8**, p. 205.
2. **12**, p. 165.
3. **8**, p. 256.

gation différentes : on aurait donc, au début des inscriptions, deux phases très nettes, les P'_1 et les P'_2. Malcewane a particulièrement étudié cette question dans son mémoire sur le séisme de l'île Macquarie[1] (26 juin 1924). L'existence de deux phases nettes, séparées par un bref intervalle de temps, est hors de discussion à partir de 17000 kms., mais quelle en est la véritable explication?

Il est curieux de constater que pour un même séisme, et pour des stations situées à la même distance de l'épicentre, la différence $P'_2 - P'_1$ varie presque du simple au double : c'est ce que montre le tableau IV, réunissant les valeurs des différences $P'_2 - P'_1$ tirées de l'étude de Macelwane. D'autre part l'examen d'une série de séismes inscrits à Strasbourg, pour des distances allant de 16600 à 18900 kms., confirme cette remarque (voir tableau V). La différence $P'_2 - P'_1$ augmente bien avec la distance, mais d'une façon tout à fait désordonnée.

De plus, si l'on examine les feuilles avec soin, on constate que souvent, au lieu d'une phase unique comprise entre P' et S_cP_cP, il y en a plusieurs, plus ou moins importantes, mais généralement nettes. Ce fait pourrait être rapproché des observations de A. et S. Mohorovičić[2]. Ces auteurs, après avoir étudié 37 séismes d'épicentres bien déterminés, sont parvenus aux conclusions suivantes, en ce qui concerne le début des inscriptions :

a) Pour des distances comprises entre 700 et 1500 kms., on ne distingue qu'une seule phase P_n, au commencement des séismogrammes.

b) A partir de 1500 kms., au cours de la première minute, on distingue une série d'impulsions séparées par des intervalles compris entre 5 et 9^s; leur étude a été poursuivie jusque vers 14000 kms.

c) Deux premières phases P_1 et P_2 ont été observées ainsi à partir de 1500 kms. environ, on en distingue une troisième à partir de 8500 (P_3), puis deux autres à partir de 11000 (P_4 et P_5).

1. **12**, p. 165.
2. **17**, p. 84, et **19**, p. 11.

On sait[1] que l'hypothèse d'une surface de discontinuité à une profondeur de 50 kms. a permis d'expliquer la présence sur les inscriptions à des distances comprises entre 200 et 675 kms. de deux types d'ondes longitudinales : les unes, dites $\overline{P}$ (ondes individuelles, continues, ou uniformes) se propagent uniquement dans la couche supérieure; les autres, P_n (ondes normales) se réfractent sur la surface de discontinuité. A. et S. Mohorovičić pensent que les surfaces de discontinuité plus profondes pourraient produire des phénomènes analogues : c'est, d'après eux, dans cette voie qu'il faudrait chercher l'explication des impulsions P_1, P_2,... P_8.

Peut-être une telle manière de voir devrait-elle être étendue aux séismes distants de 16000 kms. et plus : sans méconnaître l'importance des réflexions et réfractions à la surface du noyau, il est légitime de se demander si les autres surfaces de discontinuité ne jouent pas elles aussi un rôle qu'il faudrait chercher à déterminer.

Des recherches complétant celles de F. J. Scrase, que j'ai signalées plus haut (voir p. 129), relativement aux réflexions à la surface de la terre au voisinage de l'épicentre, présenteraient aussi un grand intérêt.

Gütenberg indique que, vers 16000 kms. les P′ doivent présenter un maximum : je n'ai rien constaté de tel. Mes observations sont, il est vrai, purement qualitatives, et il se pourrait que des mesures suffisamment nombreuses permissent de constater l'existence effective de ce maximum; mais il est certain que, s'il existe, il n'est pas très net.

D'autre part, sur un certain point, il y a un désaccord formel entre la théorie de Gütenberg et les tables qu'il a publiées. La théorie[2] prévoit l'apparition des P′ vers 16000 kms.; les tables[3] indiquent des durées de propagation pour cette phase à partir de 11000 kms. Il semble bien d'ailleurs que les ondes P′ apparaissent faiblement à cette dernière distance; elles sont, en

1. **14** et **15**. Voir aussi E. Rothé, **19**, p. 17.
2. **9**, p. 205.
3. **9**, p. 216.

tout cas, très nettes à partir de 14000 kms. Ainsi disparaîtrait une des bases sur lesquelles Gütenberg paraissait fonder ses vues théoriques.

Ces remarques ne conduiraient d'ailleurs nullement à infirmer l'existence du noyau. Aussi bien, on n'aperçoit pas aujourd'hui d'autre hypothèse qui permette d'expliquer certains phénomènes d'une façon aussi satisfaisante (disparition des P vers 14000 kms. et apparition des P′ vers 11000 kms.). Le doute qui plane sur l'existence d'un « Brennpunkt » à 16000 kms., et sur celle du double train P'_1 et P'_2 conduirait simplement à remettre en question la forme de la trajectoire et les hypothèses relatives à la loi de répartition de vitesse dans les différences couches.

3° *Les* S_cP_cP. Elles commencent, d'après Gütenberg, vers 14600 kms. et présentent un maximum pour cette distance : il s'agit d'un autre foyer (Brennpunkt)[1]. J'ai effectivement constaté leur apparition vers 15000 kms. sous forme d'impulsions importantes. Elles devraient ensuite se dédoubler en deux trains, comme les P′ : je n'ai rien observé de tel, mais pour ces distances, je n'avais pas une très grande richesse de données.

4° *Les* S_cP_cS *et les* $S_cP_cP_cS$. Elles apparaissent avec une très grande irrégularité sur les inscriptions : il est frappant de remarquer qu'au contraire les P, P′ et PR_1 conservent à peu près le même caractère pour toutes les inscriptions relatives à une distance donnée. Il y a là un fait difficile à expliquer : on songerait d'abord à des anomalies du noyau, mais alors, on devrait en constater aussi l'effet sur les P′, ce qui ne semble pas vérifié. Le problème reste donc entier.

5° Les autres phases, par suite de leur irrégularité, de leur rareté, ou de leur manque de netteté n'appellent aucune remarque particulière. Pour pouvoir tirer une conclusion de leur examen, il serait nécessaire d'avoir à sa disposition, en vue de la discussion, un nombre beaucoup plus considérable d'inscriptions.

6° J'ai déjà signalé que pour des distances de 17000 kms. et au delà apparaissaient quantité d'impulsions qui ne peuvent

1. 9, p. 187.

être identifiées avec les phases des tables. Leur étude systématique présenterait un vif intérêt soit pour la rectification des hypothèses de Gütenberg, soit pour l'introduction de nouvelles hypothèses.

B) *Les ondes transversales peuvent-elles se propager dans le noyau?*

La question de l'état physique du noyau a été l'une des plus controversées[1]. Le noyau étant soumis à des températures et à des pressions que nous ne connaissons pas, peut d'ailleurs posséder des propriétés élastiques intermédiaires entre celles des solides et des liquides tels que nous les connaissons. La séismologie doit pouvoir arriver à décider si les propriétés en question rapprochent le noyau plutôt de l'un des deux états que de l'autre.

Gütenberg[2], implicitement, penche en faveur de l'état solide, car il admet que les ondes transversales peuvent s'y propager (ondes S', P_cS_cP et autres ondes complexes), Il ajoute toutefois cette restriction que les ondes S' seraient de faible amplitude; il constate, d'autre part, que les ondes P_cS_cP et autres ondes complexes n'ont jamais pu être observées, et que les observations relatives aux ondes S' sont peu concluantes.

Malcewane[3], dans son mémoire sur le séisme de l'île Macquarie, a cru distinguer des S', et même le double train S'_1 et S'_2 : ses planches montrent des impulsions très nettes qu'il attribue à ces phases. Les durées de propagation qu'il donne pour elles s'écartent largement de celles prévues par Gütenberg. Si donc la théorie n'est pas manifestement infirmée, il serait téméraire de prétendre qu'elle est vérifiée.

Dans mes observations, je n'ai jamais trouvé de phase nette correspondant aux S' définies par Gütenberg; il semble bien que si les ondes transversales se propagent dans le noyau, c'est

1. Consulter à ce sujet l'exposé de la question dans l'ouvrage de M. E. Rothé, **22**, pp. 33-36.
2. **6**, p. 113.
3. **12**, p. 165.

en y subissant une absorption considérable, ce qui conduirait à concevoir que le noyau est sinon liquide, tout au moins pâteux.

D'ailleurs, la question ne peut être tranchée que par des mesures quantitatives ; il est nécessaire de connaître le plan et les directions de vibration de chaque phase, pour pouvoir affirmer en connaissance de cause sa nature, longitudinale ou transversale. C'est par la solution de ces problèmes que la séismologie pourra encore faire progresser nos connaissances sur la constitution interne du globe.

TABLEAU I

Liste des séismes étudiés.

DATE	DÉBUT	HEURE ORIGINE	ÉPICENTRE	RÉGION	DISTANCE KM.	N°
	h m s	h m s	° °			
12 mai 1922	18 57 10	18 39 20	22,0 S 170,0 E	Nouvelle-Calédonie.	16656	39
12 juin —	10 55 00	10 42 40	19,5 N 109,0 W	N. Californie.	10189	4
27 juin —	14 53 51	14 29 55	6,5 N 126,0 E	Philippines.	11378	15
11 nov. —	4 46 38	4 32 30	29,0 S 71,0 W	Chili.	11611	18
— —	18 23 39	18 09 12	réplique	—	11611	19
16 mars 1923	22 15 45	22 01 30	6,5 N 127,0 E	Philippines.	11522	16
19 avril —	3 23 00	3 09 30	2,5 N 118,5 E	Entre Philippines et N^lle-Guinée.	11289	13
16 sept. —	16 54 47	16 34 30	3,0 S 138,0 E	Carolines.	13089	27
2 nov. —	21 27 00	21 07 54	5,7 S 151,8 E	Mariannes.	14156	30
14 avril 1924	16 34 55	16 20 15	6,5 N 127,0 E	Philippines.	11522	17
26 juin —	1 57 28	1 37 20	57,0 N 159,0 E	Macquarie.	17878	41
24 juil. —	5 15 11	4 55 24	48,0 S 159,0 E	Macquarie.	17889	42
11 avril 1925	10 55 22	10 41 54	34,0 S 57,0 E	Océan Indien.	10389	6
3 mai —	17 36 05	17 21 42	2,5 N 126,7 E	Mer de Célèbes.	11856	23
— —	23 12 21	22 58 54	34,6 S 57,0 E	Océan Indien.	10389	7
5 mai —	10 19 48	10 06 00	9,5 S 123,0 E	Philippines.	10989	12
— —	23 35 28	23 21 00	2,5 N 126,7 E	Mer de Célèbes.	11856	24
15 mai —	12 10 52	11 57 00	25,0 S 71,0 W	Brésil.	11289	14
20 mai —	11 18 00	11 04 48	30,6 N 141,8 E	Ile Bonin-Sima.	10100	2
28 mai —	6 08 30	5 55 10	34,0 S 57,0 E	Océan Indien.	10389	8
3 juin —	4 48 14	4 33 50	3,0 N 126,0 E	Ile Céram.	11767	21
9 juin —	13 56 06	13 40 20	3,5 S 142,0 E	Carolines.	13378	29
7 juil. —	14 25 34	14 12 12	19,6 N 106,5 W	S. basse Californie.	10033	1
13 nov. —	12 28 22	12 14 40	13,0 N 124,7 E	Philippines.	10789	11
25 janv. 1926	0 55 45	0 36 12	9,0 S 159,5 E	Salomon.	14878	32
12 avril —	8 51 48	8 32 18	11,2 S 161,2 E	Ile Christobal.	15178	35
2 sept. —	1 35 06	1 21 40	34,0 N 57,0 E	W. Madagascar.	10389	9
10 sept. —	10 48 39	10 34 21	9,0 S 111,0 E	Java.	11722	20
16 sept. —	18 18 29	17 59 12	10,7 S 159,7 E	Salomon.	15056	34
3 oct. —	19 57 54	19 37 51	50,5 S 161,0 E	Macquarie.	18067	44
26 oct. —	4 04 40	3 44 35	2,7 S 38,8 E	Nouvelle-Guinée.	13111	28
24 janv. 1927	1 25 14	1 05 33	18,5 S 168,5 E	Nouvelles-Hébrides.	16233	37
1 févr. —	18 15 40	17 56 34	7,0 S 155,0 E	Salomon.	14456	31
4 févr. —	3 09 07	2 49 17	18,5 S 168,5 E	Nouvelles-Hébrides.	16233	38
3 mars —	1 19 46	1 04 57	6,3 S 122,5 E	S. Célèbes.	12323	25
14 avril —	6 37 40	6 33 28	34,5 S 69,5 W	Chili.	11800	22
3 juin —	7 27 03	7 12 06	6,7 S 131,2 E	Timorlaut.	12967	26
16 mars 1928	5 20 50	5 00 57	22,8 S 170,5 E	Ile Matthew.	16767	40
27 avril —	20 48 08	20 34 50	13,0 S 69,5 W	Pérou.	10167	3
15 juin —	6 25 48	6 12 48	12,3 N 121,0 E	Philippines.	10611	10
9 juil. —	21 42 52	21 23 22	9,5 S 160,8 E	Salomon.	14989	33
18 juil. —	19 18 11	19 04 52	5,0 S 79,5 W	Chachapoyas.	10222	5
12 sept. —	1 39 15	1 19 00	31,0 S 179,0 E	Nouvelle-Zélande.	17911	43
22 sept.	7 50 42	7 31 22	13,0 S 165,5 E	Nouvelles-Hébrides.	15556	36

Tableau II

Caractéristiques des phases.

N°	DISTANCE KM.	P	P′	S_cP_cP	PR_1	S_cP_cS	$S_cP_cP_cS$	S	PS	PPS	SR_1
1	10033	*assez net*	»	»	*net*	»	faible	*assez net*	faible	faible	faible
2	10100	*net*	»	»	faible	faible	»	*net*	faible	faible	faible
3	10167	*assez net*	»	»	faible	très faible	»	*assez net*	»	»	»
4	10189	*assez net*	»	»	*assez net*	»	»	»	*assez net*	faible	faible
5	10222	*très net*	»	»	*net*	*très net*	»	*très net*	*très net*	assez net	»
6	10389	*net*	»	»	faible	»	»	*net*	faible	faible	assez net
7		*net*	»	»	faible	»	»	*net*	faible	»	faible
8		*net*	»	»	*assez net*	*très net*	»	*très net*	»	faible	»
9		*net*	»	»	*net*	*net*	»	*très net*	*net*	net	douteux
10	10611	*net*	»	»	*net*	assez net	faible	*très net*	*très net*	douteux	»
11	10789	*très net*	»	»	*très net*	*net*	faible	faible	*net*	»	faible
12	10989	*assez net*	»	»	*assez net*	faible	»	faible	faible	»	traces
13	11289	*assez net*	»	»	*assez net*	faible	faible	»	*net*	»	»
14		*net*	traces	»	*très net*	faible	faible	»	*très net*	»	faible
15	11378	*net*	»	»	traces	traces	faible	»	*net*	»	»
16	11522	*net*	douteux	»	*très net*	*très net*	*net*	»	faible	*net*	*net*
17		*net*	traces	»	*net*	faible	faible	»	douteux	»	»
18	11611	*assez net*	faible	»	*très net*	traces	faible	»	douteux	*net*	»
19		*net*	traces	»	*net*	faible	»	»	*net*	faible	»
20	11722	*net*	faible	»	*net*	*net*	faible	»	faible	faible	»
21	11767	*net*	douteux	»	*net*	*très net*	»	»	*net*	»	faible
22	11800	*net*	faible	»	*très net*	assez net	»	»	*très net*	*très net*	assez net

Tableau II

(suite.)

N°	DISTANCE KM.	P	P'	S_cP_cP	PR_1	S_cP_cS	$S_cP_cP_cS$	S	PS	PPS	SR_1
23	11856	*net*	faible	»	*net*	faible	faible	»	*net*	faible	»
24		*net*	faible	»	*net*	faible	»	»	»	faible	»
25	12323	douteux	»	»	*très net*	»	faible	»	faible	*très net*	faible
26	12967	*net*	très faible	»	*très net*	faible	faible	»	*très net*	*très net*	»
27	13089	»	»	»	*très net*	faible	»	»	*assez net*	»	»
28	13111	faible	»	»	*très net*	»	»	»	*net*	assez net	douteux
29	13378	faible	traces	»	*net*	»	»	»	*net*	faible	faible
30	14156	faible	*net*	»	*assez net*	faible	»	»	faible	*net*	»
31	14456	»	*net*	»	*net*	»	»	»	traces	traces	traces
32	14878	»	*assez net*	»	»	»	»	»	*assez net*	assez net	»
33	14989	»	*net*	*très net*	*net*	»	»	»	»	»	»
34	15056	»	*très net*	*net*	faible	»	*net*	»	»	»	»
35	15178	»	*net*	»	»	»	»	»	»	*assez net*	»
36	15556	»	*net*	faible	*net*	faible	»	»	douteux	douteux	faible
37	16233	»	*très net*	faible	*net*	»	faible	»	faible	»	faible
38		»	*net*	*net*	*net*	»	»	»	»	»	»
39	16656	»	*très net*	*net*		»	»	»	»	»	faible
40	16767	»	*net*	faible	*net*	douteux	faible	»	»	faible	*net*
41	17878	»	*net*	»	*net*	»	»	»	»	»	faible
42	17889	»	*net*	faible	faible	»	»	»	»	»	»
43	17911	»	*net*	faible	*très net*	faible	*net*	»	»	»	»
44	18067	»	*très net*	assez net	*net*	net	net	»	»	»	»

TABLEAU III

Différences entre les durées de propagation observées et les durées calculées pour les principales phases des séismes étudiés.

N°	DISTANCE KM.	P	P'	PR_1	PR_2	PR_3	S	PS	PPS	SR_1
1	10033	+17s	» s	+10s	» s	» s	—14s	+18s	— 4s	+ 8
2	10100	+ 5	»	0	— 1	»	— 3	+ 5	— 9	—20
3	10167	+ 8	»	+ 4	»	»	»	+15	»	»
4	10189	—52	»	—50	—55	»	»	—76	—44	—38
5	10222	+ 6	»	0	»	»	+13	+13	+ 3	»
6	10389	+ 7	»	+18	»	+ 3	+14	— 8	+ 8	+30
7		+ 6		+12	— 1	+ 5	+ 8	»	—17	»
8		— 1	»	+ 6	»	»	+14	— 7	»	+ 6
9		+ 5		— 4	»	—15	+11	+17	+21	»
10	10611	—14	»	— 5	»	—21	+ 2	+ 3	»	»
11	10789	+ 2	»	+ 4	—11	»	— 5	+22	»	—20
12	10989	— 2	»	— 5	»	»	+ 2	—16	»	»
13	11289	—34	»	—35	»	—36	»	—35	»	—25
14		—12	»	+ 2	+22	»	»	0	»	»
15	11378	—11	»	»	»	»	»	+ 1	»	»
16	11522	— 1	»	— 2	—12	+10	»	»	»	»
17		+ 1	»	+12	»	»	»	— 2	+14	—16
18	11611	—10	+ 3	— 4	»	»	»	»	—14	»
19		+ 9	»	+ 6	»	»	»	+16	+ 9	»
20	11722	— 5	+10	+ 6	»	»	»	+ 9	—12	»
21	11767	— 1	»	+ 8	— 4	»	»	+ 3	»	+ 5
22	11800	—14	— 4	+ 7	+ 8	»	PR_4	+37	+32	+27
23	11856	— 6	—20	—10	—30	»	»	0	0	»
24		— 1	»	0	— 3	»	»	»	— 3	»
25	12323	(0)	»	—12	»	»	»	+14	+ 7	— 2
26	12967	—18	— 3	—31	»	— 8	»	—29	— 3	»
27	13089	»	»	— 5	—10	»	»	— 3	»	»
28	13111	»	»	—18	»	»	»	—15	—29	»
29	13378	+14	»	—10	— 9	»	»	+11	—18	0
30	14156	»	—11	—23	»	+ 8	»	— 8	— 5	»
31	14456	»	—16	—26	+ 6	»	»	»	»	»
32	14878	»	+14	»	»	»	»	+ 3	+19	»
33	14989	»	— 1	—13	»	»	»	»	»	»
34	15056	»	—12	— 9	— 14	»	»	»	»	»
35	15178	»	— 4	»	»	»	»	»	»	»
36	15556	»	—21	—28	»	»	— 8	—40	—43	—13
37	16233	»	—11	—14	»	»	»	+ 1	»	— 2
38		»	— 2	— 8	»	»	»	»	»	»
39	16656	»	— 5	— 7	»	»	»	»	»	—10
40	16767	»	—10	— 8	+12	— 1	—21	»	—14	— 4
41	17878	»	—11	—11	»	—11	—26	»	»	— 9
42	17889	»	—32	— 4	»	»	»	»	»	»
43	17911	»	— 4	—16	— 2	+ 7	»	»	»	»
44	18067	»	—17	+ 4	+ 8	»	»	»	»	»

TABLEAU IV

Différences $P'_2 - P'_1$, d'après le mémoire de Macelwane sur le séisme de l'île Macquarie.

DISTANCES DEGRÉS	$P'_2 - P'_1$	DISTANCES DEGRÉS	$P'_2 - P'_1$	DISTANCES DEGRÉS	$P'_2 - P'_1$	DISTANCES DEGRÉS	$P'_2 - P'_1$
146,7	21s	155,9	24s	159,0	50s	162,3	61s
147,6	18	156,3	45	159,2	51	165,6	68
152,0	34	156,8	31	159,6	55	167,3	80
152,3	39	157,3	41	160,3	57	168,1	82
154,2	35	157,9	42	160,3	50	168,6	78
154,5	30	158,2	50	162,0	48		
154,8	45	158,4	40	162,1	57		

TABLEAU V

Différences $P'_2 - P'_1$, d'après les inscriptions de Strasbourg.

DATE	DISTANCES KM.	$P'_2 - P'_1$	DATE	DISTANCES KM.	$P'_2 - P'_1$
29 juin 1928	16011	21s	24 juillet 1924	17889	44s
6 novembre —	16600	42	12 septembre 1928	17911	55
15 mars 1927	16767	20	3 octobre 1926	18067	95
1 avril —	16978	16	13 février 1931	18344	60
26 juin 1924	17878	55	2 février —	18411	80
6 juin 1927	17878	48	16 juin 1929	18900	73

N. B. — Les distances, pour les séismes antérieurs au 1er octobre 1928, proviennent des déterminations de l'International Summary; pour les autres, des déterminations faites à Strasbourg.

BIBLIOGRAPHIE

ABRÉVIATIONS

Beiträge.....	Gerlands Beiträge zur Geophysik, herausgegeben von V. Conrad u. a., Wien.
Gött.....	Aus den Nachrichten der K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse.
Phys. Zeitsch.....	Physikalische Zeitschrift, herausgegeben von P. Debye u. a., Leipzig.
Publ. Bureau Cent ..	Publications du Bureau Central Séismologique International sous la direction de E. Rothé, secrétaire de la Section de Séismologie, Série A, Travaux scientifiques (Paris et Toulouse).

1. H. P. Berlage. — *Sur la profondeur de foyer d'un tremblement de terre déduite d'un séismogramme d'une station éloignée*. Publ. Bureau Cent. fasc. 1, Toulouse, 1924.
2. P. Byerly. — *Dispersion of Energy*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 14, 1924.
3. B. Galitzine. — *Sur l'angle d'émergence des rayons sismiques*. Comptes rendus des séances de la Commission sismique permanente, Petrograd, 1919.
4. L. Geiger et B. Guetenberg. — *Ueber Erdbebenwellen*. Gött. VI, 1912.
5. B. Guetenberg. — *Ueber Erdbebenwellen*. Gött. VII A, 1914.
6. B. Guetenberg. — *Ueber den Erdkern*. Zeitschrift für angewandte Geophysik, 1, 1925.
7. B. Guetenberg. — *Die elastischen Konstanten im Erdinnern*. Phys. Zeit. 24, 1923.
8. B. Guetenberg. — *Lehrbuch der Geophysik*. Berlin, 1926.
9. B. Guetenberg. — *Handbuch der Geophysik*. Bd. IV, Lfg. 1, Berlin, 1929.

10. H. Jeffreys. — *Tables of the times of transmission of the P and S waves of earthquakes.* British Association for the advancement of Science, Newport, 1932.

11. O. Klotz. — *Seismological Tables.* Publications of the Dominion Observatory, Ottawa, vol. III, n° 2, 1916.

12. J. B. Macelwane. — *The South Pacific Earthquake of June 26, 1924.* Beiträge 28, 1930.

13. J. B. Macelwane. — *Tables of travel times* (polycopiées).

14. A. Mohorovičić. — *Das Beben vom 8 X 1909.* Jahrbuch des Meteorologischen Observatorium in Zagreb, 1910.

15. A. Mohorovičić. — *Tables.* Publ. Bureau Cent., fasc. 3, Paris, 1925.

16. A. Mohorovičić. — *Hodograph der ersten longitudinalen Wellen eines Bebens.* Bulletin des travaux de la classe des sciences mathématiques et naturelles, 2, juillet 1914, Zagreb.

17. A. Mohorovičić. — *Neue Phasen im Anfange des Bildes eines Bebens.* Id., 4, juillet 1915, Zagreb.

18. A. et S. Mohorovičić. — *Hodographen der longitudinalen und transversalen Wellen eines Bebens.* Auszug aus der im « Rad » Bd 226 (1922) veröffentlichen Abhandlung.

19. S. Mohorovičić. — *Die reduzierte Laufzeitkurve und die Abhängigheit der Herdtiefe.* Beiträge 14, 1915.

20. A. Rey-Pastor. — *La profondidad del foco sismico.* Iberica, 924, Madrid, 1932.

21. E. Rothé. — *Les ondes séismiques et leur propagation.* Mémorial des Sciences physiques, publié sous le patronage de l'Académie des sciences de Paris, fasc. XII, Paris, 1930.

22. E. Rothé. — *Le tremblement de terre.* — Paris, 1925.

23. E. Rothé. — *Sur la propagation des ondes séismiques au voisinage de l'épicentre. Exposé d'après les travaux de A. Mohorovičić.* Publ. Bureau Cent., fasc. 1, Toulouse, 1924.

24. F. J. Scrase. — *The reflected Waves from Deep Focus Earthquakes.* Proceedings of the Royal Society, vol. 132, London, 1931.

25. V. C. Stechschulte, S. J. — *The Japanese earthquake of March 29, 1928 and the problem of depth of focus.* Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 22, n° 2, 1932.

26. H. H. Turner. — *Expanded Tables for P, S, and S-P.* University Observatory, Oxford, 1923.

27. H. H. Turner. — *The large Earthquakes, 1913.* Newport, 1917. (Voir aussi les numéros de 1914 à 1918).

28. H. H. Turner. — *The International Seismological Summary*. Oxford, 1922-1928.

29. S. W. Visser. — *Verhandelingen*. Koninklijk Magnetisch en Meteorologisch Observatorium te Batavia, n° 7, 1921.

30. S. W. Visser. — *Verhandelingen*. — Koninklijk Magnetisch en Meteorologisch Observatorium te Batavia, n° 22, 1930.

31. E. Wiechert und L. Geiger. — *Bestimmung des Weges der Erdbebenwellen im Erdinnern*. Phys. Zeitsch. 11, 1910.

32. E. Wiechert und K. Zoeppritz. — *Ueber Erdbebenwellen*. Gött. II, 1907.

33. K. Zoeppritz. — *Ueber Erdbebenwellen*. Gött. VII B, 1917.

34. K. Zoeppritz und L. Geiger. — *Ueber Erdbebenwellen*. Gött. III, 1909.

35. K. Zoeppritz, L. Geiger und B. Guetenberg. — *Ueber Erdbebenwellen*. Gött. V, 1912.

Vu et approuvé :

Strasbourg, le 1er mars 1933.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

E. ROTHÉ.

Vu et permis d'imprimer :

Strasbourg, le 2 mars 1933.

Le Recteur de l'Académie,

J. DRESCH.

TABLE DES MATIÈRES

Recherches sur les séismographes destinés à l'inscription de la composante verticale du mouvement du sol.

Pages

INTRODUCTION 5

CHAPITRE I. — Historique 8

CHAPITRE II. — Recherches récentes. — La composante verticale du grand pendule de Strasbourg 16

A. Appareils à inscription optique 16

I. Travaux de Wilip et Gütenberg relatifs à l'appareil Galitzine 16

II. Appareil Wenner 18

III. Appareil Benioff 20

B. Appareils à inscription mécanique 23

I. Appareil de Quervain-Picard 24

II. Grand pendule de Strasbourg 25

1° Ressorts 29

2° Construction de la composante verticale 29

3° Vérification des composantes horizontales 31

4° Période des oscillations 32

5° Cofficient d'élasticité du système 33

6° Mesure de l'agrandissement 34

7° Amortissement et frottement 35

8° Vérifications diverses 35

CHAPITRE III. — Obtention d'une période convenable 41

1re Catégorie.

I. Appareil Ewing 41

II. Appareil Galitzine, construction de Wilip 42

2e Catégorie.

I. Appareil Straubel 44

II. Appareil Wiechert 45

1° Étude des ressorts auxiliaires 51

2° Coefficient d'élasticité du système 53

3° Allongement des ressorts auxiliaires pour les diverses périodes..... 56
4° Discussion des résultats..... 56
5° Charge limite..... 58

III. Le grand pendule de Strasbourg..... 59
1° Caractéristiques des ressorts..... 60
2° Marche des expériences..... 62
3° Emploi de masses additionnelles..... 63
4° Effet des liaisons élastiques..... 63
5° Tensions obtenues..... 65
6° Constantes obtenues..... 65
7° Comparaison d'inscriptions obtenues à l'aide des trois appareils verticaux..... 76

Chapitre IV. — Sensibilité des appareils à la température. — Compensation..... 81

2e Catégorie.

I. Appareil Wiechert de 1200 Kgr., Appareil de Quervain-Piccard, Grand pendule de Strasbourg..... 81
II. Appareil Straubel..... 84

1re Catégorie.

I. Appareil Ewing..... 86
II. Appareil Galitzine et Wiechert de 80 Kgr..... 87
III. Construction de Wilip..... 89
IV. Effets de la dilatation..... 91

Influence de la température sur les dispositifs d'amplification.

I. Inscription sur noir de fumée..... 92
II. Inscription galvanométrique..... 93

Autres appareils..... 96

Différents types de compensation.

I. Dispositifs basés sur la dilatation..... 97
II. Compensation à bilames..... 101
III. Utilisation de ressorts en élinvar..... 103
IV. Compensation hydraulique..... 105
V. Compensation du grand pendule de Strasbourg.
1° Effets de la température..... 106
2° Principe..... 108
3° Installation..... 109
4° Étude du dispositif..... 111

Résumé..... 114

Bibliographie..... 117

Sur les phases des séismes très éloignés (10000 Km. et au delà).

I. Les phases classiques. — Les courbes de Wiechert et Zöppritz 121

II. Les surfaces de discontinuité 123

III. Tables et courbes pour les distances éloignées. — Phases réfléchies ou réfractées sur la surface du noyau .. 125

IV. Observations faites sur les inscriptions obtenues à Strasbourg 130

A. Résultats des observations 132

B. Conclusions au point de vue de l'interprétation 133

C. Comparaison entre les durées de propagation des tables de Macelwane et des résultats de l'observation 134

V. Comparaison des résultats obtenus avec ceux de Gütenberg et de Macelwane :

A. Les phases observées 136

1° Les P et les S 136

2° Les P' 136

3° Les S_cP_cP 139

4° Les S_cP_cS et les $S_cP_cP_cS$ 139

5° Les autres phases 139

B. Les ondes transversales peuvent-elles se propager dans le noyau ? 140

BIBLIOGRAPHIE 147

TABLE DES MATIÈRES 153

Toulouse. — Typ. Édouard Privat. — 3857. — 5-1933